

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за получаване на образователната и научна степен
„Доктор“

в професионално направление 4.1. Физически науки

Докторска програма: „Теоретична и математическа физика“

Тема на дисертационния труд: „Структура и астрофизика на самогравитиращи обекти в мултискаларни теории“

Автор на дисертационния труд: Радостина Жекова Желева, редовен докторант в катедра „Теоретична физика“ към Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“

Научен ръководител: чл.-кор. проф. дфзн Стойчо Стоянов Язаджиев (ФзФ-СУ)

Рецензент: доц. д-р Галин Николаев Гюлчев (ФзФ-СУ)

1. Кратки биографични данни за докторантката

Радостина Жекова Желева придобива образователно-квалификационната степен „Магистър“ по специалност „Физика“ с професионална квалификация „Магистър по физика – теоретична и математическа физика“ през месец октомври 2018 г. в СУ „Св. Климент Охридски“. През месец януари 2019 г. тя е зачислена като редовен докторант в катедра „Теоретична физика“ на Физическия факултет на СУ с ръководител чл.-кор. проф. дфзн Стойчо Стоянов Язаджиев. След успешно изпълнение на предвидения индивидуален план за обучение и научноизследователска работа, Радостина Желева е отчислена с право на защита и на 17.01.2023 г. с решение на Факултетния съвет на Физическия факултет е насочена за официална защита пред научно жури.

2. Общо описание на дисертацията и на представените материали

Магистър Радостина Желева е представила дисертационен труд за придобиване на образователната и научна степен „доктор“ написан на български език, в обем от **80** страници. В дисертацията са представени **17** фигури. Дисертацията започва с кратко резюме и е структурирана в **4** основни глави, последвани от списък с публикации на докторантката в реферирани списания и завършва с благодарности. Представен е списък с използвана литература, който съдържа **136** заглавия.

В уводната Глава 1 са разгледани квази-периодични осцилации от акреционен диск, гравитиращ около въртящи се проходими пространствено-времеви тунели. Въведен е общ клас от геометрии, които описват стационарен аксиалносиметричен пространствено-времеви

тунел на Тео, изследвана е стабилността на кръговите орбити в екваториалната равнина, изучени са свойствата на епицикличните честоти на частиците от диска в разглежданата геометрия и са изследвани нелинейните резонанси. Получените резултати са сравнени с тези характерни за въртящата се черна дупка на Кер. В Глава 2 е доказано съществуването на сферично-симетрични черни дупки в някои класове от мулти-скаларните Айнщайн-Гаус-Боне (МСАГБ) теории на гравитацията за линейни и експоненциални куплиращи функции. Изучени са също така характеристики на черните дупки, като площ на хоризонта, ентропия, фотонна сфера и са дискутирани наблюдателните перспективи. В Глава 3 са изследвани скаларизирани не-топологични неутронни звезди в мулти-скаларни Гаус-Боне теории на гравитацията. Разгледани са статични и сферично-симетрични решения за неутронни звезди удовлетворяващи уравненията на МСАГБ теории на гравитацията. Представени са използваните числени методи и са анализирани получените резултати. Изследваните модели, имат нулево скаларно поле в центъра на звездата, а представените резултати са за куплираща функция позволяваща скаларизация. В Глава 4 са формулирани научните приноси на дисертационния труд.

Представен е автореферат на дисертацията в обем от **41** страници. Авторефератът отразява правилно съдържанието и целите на дисертацията.

Дисертационният труд се базира на **3** научни публикации, които са приложени в пълен текст към представените материали по дисертацията. Всяка една от публикациите на докторантката е публикувана в съавторство в рецензирани списания от квартал **Q1** с импакт-фактор над **4.6**.

3. Цел на дисертацията и актуалност на тематиката

Съвременните модели на гравитацията надграждат експериментално потвърдената ОТО като допускат съществуването на нови, неоткрити до сега скаларни полета. В тези алтернативни теории, имащи за цел търсене на нова фундаментална физика, гравитацията се описва както от метричния тензор така и от едно или множество скаларни полета. Значителен интерес за съвременната физика са гравитационни теории със скаларни полета куплирани към кривината на пространство-времето, към които спадат и мултискаларните Гаус-Боне теории. Тези теории предсказват съществуването на обекти от нов тип като спонтанно-скаларизирани черни дупки и неутронни звезди, както и проходими пространствено-времени тунели без присъствие на екзотична материя. Това от своя страна хвърля светлина върху съществуването на нови неизследвани до сега астрофизични ефекти, които могат да послужат като инструмент за наблюдателно проявление на тези гравитационни обекти в бъдеще време. Обещаващ инструмент за тестване на гравитацията в режим на силни гравитационни полета е рентгеновата спектроскопия, с която могат да се изучават различни характеристики на еми-

сионния поток на акреционните дискове около компактните обекти посредством следващите поколения рентгенови спътници като LOFT, eXTP или STROBE-X.

Дисертацията е посветена на изучаването на квази-периодичните колебания в акреционни дискове около въртящи се проходими пространствено-времеви тунели с помощта на резонансни модели. Показано е, че астрофизиката на квази-периодичните осцилации може съществено да се отличава от тази за въртящите се черни дупки на Кер, което може да послужи за наблюдателното им различаване. Друга основна задача на дисертацията е да докаже числено съществуването на решения описващи черни дупки и неутронни звезди в мултискаларната Гаус-Боне гравитация с максимално симетрично скаларно пространство за няколко куплиращи функции, включително случая за спонтанна скаларизация. Направено е също така и систематично изследване на площта на хоризонта и ентропията на черните дупки както и радиуса на фотонната сфера.

Именно поради това, няма никакво съмнение в актуалността на изследваните в дисертацията научни проблеми, които са на предния фронт на съвременната гравитационна теория.

4. Теоретична постановка и методи за решаване на проблема

При някои астрофизични ефекти като образи на сенки и акреционни дискове, емисионните линии на желязото, квазинормалните моди и пертурбациите на звездните орбити пространствено-времевите тунели могат да имитират черната дупка на Кер. Поради това е необходимо да се изследват допълнителни наблюдаеми ефекти в електромагнитния спектър, които могат да разграничат пространствено-времевите тунели от други компактни обекти, чрез изучаване на високочестотните квази-периодични осцилации в пространство-времето на тунелите. За целта в Глава 1 на дисертацията се разглежда клас от геометрии, конструирани от Едуард Тео, които описват стационарен и аксиалносиметричен пространствено-времеви тунел, представляващ обобщение на статичния и сферичносиметричен пространствено-времеви тунел на Морис-Торн. В геометрия на Тео са разгледани по-специално клас от метрики с интегрируеми геодезични уравнения. В последствие е направено изследване за съществуването и линейната стабилност на кръгови геодезични линии в екваториалната равнина и са изведени изрази за специфичната енергия, ъглов момент и ъглова скорост на орбитите както и радиалните и вертикалните епициклични честоти. В допълнение, за по-реалистично описание на процесите в акреционния диск са включени допълнителни нелинейни членове в пертурбативните уравнения. Направен е подробен анализ на квази-периодичните осцилации в рамките на резонансните модели в сравнение с черната дупка на Кер. Установено, че в геометрията на пространствено-времевите тунели резонансите притежават по-богата структура,

което дава възможност за по-ефективно моделиране на наблюдателните данни от рентгеновата спектроскопия на техните акреционни дискове.

Гравитационно-вълновата астрономията може да осигури възможност за тестване на гравитацията в режим на силно поле и в обозримо бъдеще да доведе до налагане на ограничения върху параметрите на модифицираните теории. От особен интерес са скаларно-тензорните теории на гравитацията, които допускат скаларни степени на свобода. Важен пример за гравитационна теория, модифицираща ОТО, е Гаус-Боне гравитацията, в която скаларното поле е куплирано с Гаус-Боне инварианта и полевите уравнения са от втори ред както в ОТО. В Глава 2 на дисертацията е разгледано мулти-скаларно разширение на стандартната Гаус-Боне гравитация. В мулти-скаларно-тензорните теории вместо едно скаларно поле се въвеждат N динамични скаларни полета, куплирани в Гаус-Боне инварианта и приемащи стойности в абстрактно скаларно Риманово пространство. Въвеждането на множество скаларни степени на свобода води до съществуването на нов тип компактни обекти в случаи на нетривиално картографиране между пространство-времето и таргет пространството. В дисертацията е доказано числено съществуването на сферично-симетрични черни дупки в някои класове от МСАГБ теории на гравитацията за линейни и експоненциални куплиращи функции, както и куплиращи функции водещи до спонтанна скаларизация. По конкретно са разгледани МСАГБ теории на гравитацията, чието пространство на скаларните полета е тримерно максимално симетрично пространство и в случаи на нетривиално картографиране между пространство-времето и таргет пространството. За целта след математическото формулиране на Айнщайн-Гаус-Боне гравитацията са изведени редуцираните полеве уравнения и е дискутирано условието за съществуване на черни дупки. Численото решаване на системата от уравнения се базира на метода на престрелката при прилагане на подходящи гранични условия на безкрайност и условия за регулярност върху хоризонта. Пресмятанията са извършени при използването на линейна и експоненциална куплираща функция, която допуска съществуването на черни дупки със скаларна коса, включвайки спонтанно скаларизирани черни дупки.

В Глава 3 на дисертацията са разгледани статични и сферично-симетричните решения за неутронни звезди, удовлетворяващи уравненията на МСАГБ гравитацията. Геометричната постановка следва напълно постановката за черни дупки със същите скаларни полета. Получени са размерно редуцираните полеве уравнения към, които е добавено уравнението за хидростатично равновесие на флуид. Използвано е реалистично уравнение на състоянието (УнС), което допуска максимални маси на неутронните звезди по-големи от 2 слънчеви маси. За числените пресмятания е използвано негова политропна апроксимация. Тъй като численото намиране на решения е труден и времеемък процес изследванията са ограничени до едно УнС и една куплираща функция. Редуцираните уравнения и уравнението за хидростатично равновесие са решени числено с налагане на естествените гранични условия за регулярност в

центъра на звездата и асимптотическа плоскост на безкрайност. За изучаване на стабилността на намерените скаларизирани решения е изследвана енергията на свързване на звездата.

5. Получени резултати и лични приноси на кандидата

Основните оригинални резултати, съдържащи се в Глава 1-ва, Глава 2-ра и Глава 3-та могат да се формулират както следва:

5.1) Изследвани са квази-периодичните осцилации на частици в акреционен диск около въртящи се проходими пространствено-времеви тунели с помощта на резонансните модели. Изследвана е също така и линейната стабилност на екваториалните кръговите геодезични отбити за общ клас пространствено-времеви тунели и са изведени аналитични изрази за епцикличните честоти. Направено е сравнение на получените квази-периодични осцилации в сравнение с тези характерни за въртящата се черна дупка на Кер и са демонстрирани важните отличителни характеристики, разграничаващи пространствено-времевите тунели от черните дупки. За разлика от постоянното подреждане на орбиталните и епцикличните честоти за всички моменти на въртене на черната дупка на Кер, при пространствено-времевите тунели съществуват различни видове подреждания между честотите в различните региони на параметричното пространство. Това свойство на пространствено-времевата геометрия на тунелите позволява осъществяване на много по-разнообразни видове резонанси, включително, параметрични и принудени резонанси от по-нисък порядък, което може да доведе до по-силни видими сигнали. От друга страна, резултатите показват, че за еднакво въртящи се орбити резонансите могат да бъдат възбудени в много близка околност на гърлото на тунела, за широк диапазон от стойности на ъгловия момент на въртене, което само по себе си е дава възможност за тестване на гравитацията в режим на силни полета.

5.2) Направено е числено доказателство за съществуването на черни дупки в мултискаларните теории на Гаус-Боне с максимално симетрично скаларно пространство за няколко куплиращи функции, включително случая на спонтанна скаларизация. Изследвани са различни характеристики на черните дупки и пространство-времето около тях, като площта на хоризонта, ентропията и радиуса на фотонната сфера. Показано е, че едно от най-важните свойства на получените решения е анулиране на скаларния заряд, което е знак за потиснато диполно излъчване, водещо до незначителни наблюдателни ограничения в сравнение с болшинството от модифицираните теории на гравитацията, притежаващи скаларна степен на свобода. За една от куплиращите функции са намерени клонове на скаларизирани черни дупки с нетривиална структура, изразяваща се в неединственост на скаларизираните решения.

5.3) Намерени са числени решения, описващи спонтанно скаларизирани неутронни звезди в мултискаларните теории на Гаус-Боне с максимално симетрично скаларно пространство. Построени са зависимостите $M(\rho)$ и $M(R)$, а също така и зависимостта на енергията

на свързване от барионната маса, носещи информация за стабилността на неутронните звезди.

6. Публикации по дисертацията и значимост на резултатите

Съдържанието на дисертацията е основано 3 научни труда, всеки един от които е публикуван във водещо световно списание от квартал $Q1$ с висок импакт-фактор: две от статиите са публикувани в списанието *Physical Review D* (IF : 5.131 за 2020 г. и IF : 5.217 за 2021 г.) и една статия е публикувана в *European Physical Journal C* (IF : 4.678 за 2021 г.). Според предоставената авторска справка за приносния характер на научните трудове докторантката има съществен принос в 1 публикация, и има един изнесен доклад на научен семинар, с което покрива препоръчителните критерии на Физическия факултет на СУ. Макар трудовете на докторантката да са в съавторство с научния ѝ ръководител, тя има несъмнено съществен принос особено в частта с изчисляване на квази-периодичните осцилации в геометрията на проходимите, въртящи се пространствено-времеви тунели.

Значимостта на научните резултати в дисертацията се заключава в тяхната актуалност в контекста на активните и широкомащабни изследвания на големи международни научни колаборации на гравитацията в режим на силни полета, в това число и принос във все по-силно развиващата се гравитационно-вълнова астрономия.

7. Критични забележки и препоръки

Нямам критични забележки към дисертационния труд. Изложението е представено в ясен стил и оставя впечатление за задълбочено разбиране на тематиката.

8. Лични впечатления от дисертантката

Защитаващата дисертационния труд се отличава със следните качества:

8.1) Постигнатите резултати в дисертацията са новаторски и представляват значителен принос към тежкото и нетривиално численото изследване на гравитационно-полеви уравнения в мулти-скаларните теории на гравитацията.

8.2) В дисертацията се решават актуални проблеми, които са от съществено значение за развитие на гравитационната физика в условията на силна международна конкуренция.

8.3) Дисертантката демонстрира добро познаване на литературата, задълбочено вникване и разбиране на основните проблеми и задачи за решаване по дадената тематика.

8.4) Дисертантката показва професионални умения за боравене със сложни математически техники приложими в нетривиалните проблеми на съвременната теоретична астрофизика.

8.5) Резултатите по дисертацията са публикувани в престижни международни физически списания.

Въз основа на изложените факти, считам, че представената дисертация е на високо научно ниво и съм убеден, че неговата авторка притежава висока научна квалификация да провежда самостоятелни научни изследвания и да развие успешна бъдеща научна кариера. Считам, че са удовлетворени всички изисквания на закона за развитието на академичния състав в Република България и на правилниците за неговото прилагане и **препоръчвам на почитаемото научно жури да присъди на магистър Радостина Жекова Желева образователната и научна степен „доктор”** в професионално направление 4.1 „Физически науки“ по докторска програма „Теоретична и математическа физика“.

28.03.2023 г.

Изготвил рецензията:.....

(доц. д-р Галин Гюлчев)