

РЕЦЕНЗИЯ
на дисертационен труд
за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
в професионално направление 4.1 Физически науки,
ДП Теоретична и математическа физика,
по процедура за защита във Физически факултет (ФзФ)
на Софийски университет „Св. Климент Охридски“ (СУ)

Рецензията е изготвена от: **проф. дфзн Светлана Йорданова Пачева, ИЯИЯЕ-БАН** (пенсионер), в качеството ѝ на член на научното жури съгласно Заповед № РД 38-94 / 21.02.2023 г. на Ректора на Софийския университет.

Тема на дисертационния труд: *“Ограничения върху теории на гравитацията в силен режим чрез анализ на компактни астрофизични обекти”*

Автор на дисертационния труд: Виктор Ивайлов Данчев

I. Общо описание на представените материали

1. Данни за представените документи

Кандидатът Виктор Ивайлов Данчев е представил следните документи:

- (а) дисертационен труд и автореферат на английски език, автореферат на български език; а така също съгласно [Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“](#);
- (б) копия от публикациите по темата на дисертацията; (в) професионална автобиография;
- (г) диплома за магистър; (д) декларация за авторство; (е) атестация за третата година на докторантурата;
- (ж) таблица с авторска справка за приносите; (з) две приложения-декларации от член-кор. Стойчо Язаджиев удостоверяващи оригиналност и отсъствие на плагиатство в дисертационния труд на кандидата.

Представените от кандидата документи по защитата съответстват на изискванията на ЗРАСРБ, ППЗРАСРБ и [Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“](#) (ПУРПНСЗАДСУ).

2. Данни за кандидата

Дисертантът Виктор Ивайлов Данчев завършва висше образование (магистър) във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“ през 2019 г. в програма „Теоретична и математическа физика“ като защитава магистърска теза с отличен успех под ръководството на член-кор. Стойчо Язаджиев. В периода 2020-2023 г. става редовен докторант по докторска програма „Теоретична и математическа физика“ също така под научното ръководство на член-кор. Стойчо Язаджиев. В. Данчев успешно съчетава научно-изследователската си работа по дисертацията с активна професионална дейност като член на научния и инженерно-технически колектив на съвременната високотехнологична българска компания ЕндуроСат АД в областта на космическите технологии, където от 2021 г. заема длъжността „технически директор“, отговарящ за координация на техническия екип на компанията и нейните мисии. Особено впечатление прави фактът, че освен задълбочени теоретични познания в областта на гравитацията, астрофизиката и космологията, свързани с работата му по дисертацията, В. Данчев притежава и високопрофесионални умения в областта на информационните техноло-

гии. Заедно с това той участва активно в значителен брой авторитетни международни конференции и школи в САЩ, Австрия, Русия, Португалия, Унгария и България.

Дисертацията се основава на 3 статии в съавторство с научния ръководител член-кор. Стойчо Язаджиев и научния консултант д-р Даниела Донева, публикувани в най-авторитетни международни физически списания с Q1-ранкинг. Преди работата върху дисертационната тематика В. Данчев е съавтор и на още 6 публикации в областта на физиката на кондензираната материя (4 публикации), физиката на високите енергии (1) и астрофизиката (1).

3. Обща характеристика на научните постижения на кандидата

Основната мотивация за формулиране на тематиката и изследователските задачи на дисертацията е вдъхновена от съвременното бурно развитие на изследванията на новите разширени (модифицирани) теории на гравитацията обобщаващи гравитационната теория, формулирана чрез действието на Айнщайн-Хилберт, известна като Обща теория на относителността (ОТО). ОТО успешно описва наблюдателните данни при слаби гравитационни полета (например в Слънчевата система). Възникването на обобщения на ОТО се дължи преди всичко на голямото изобилие от наблюдателни резултати в съвременната гравитация, астрофизика и космология, част от които не могат да бъдат обяснени в рамките на ОТО, в това число - ефектите и проявленията на така наречените „тъмна енергия“ и „тъмна материя“, еволюцията на Вселената, проблемите с „ H_0 -tension“ - несъответствията между, от една страна, получената от съвременните наблюдения стойност за настоящия момент на параметъра на Хъбъл описващ разширението на Вселената, и екстраполираната към днешната епоха негова стойност от моделната ѝ стойност за ранната Вселена), проблемът с квантуване на гравитацията и др..

Решаваните в дисертацията проблеми са посветени конкретно на числено и аналитично моделно изследване на структурата и свойствата на компактни обекти във Вселената, които типично пораждат силни гравитационни полета. Като пример на такива компактни обекти се разглеждат неутронни звезди, черни дупки, пулсари състоящи се от двойка неутронна звезда и бяло джудже и от двойка черни дупки в контекста на следните съвременни гравитационни теории: стандартната ОТО; нейни разширени/модифицирани теории: скаларно-тензорни и мултискаларно-тензорни теории, и скаларна Гаус-Боне теория на гравитацията.

Тематиката на дисертацията е в областта на съвременната фундаментална научна дисциплина – обобщени (разширени) алтернативни гравитационни теории и приложения в съвременната астрофизика и космология. Сравняването на наблюдаемите данни за характеристиките на компактни обекти с техните стойности в различните гравитационни теории е от решаващо значение за отхвърлянето или жизнеността на дадена обобщена гравитационна теория или ограничения върху параметрите ѝ.

Тази област предизвиква огромен интерес и е предмет на интензивно развитие, най-вече благодарение на получената и очаквана наблюдателна информация от крупните международни научни експерименти, провеждани от научната колаборация LIGO-VIRGO-KAGRA и посветени на наблюдения на гравитационните вълни излъчвани при сливания на два или повече компактни обекти от неутронни звезди, черни дупки и бели джуджета.

Затова няма съмнение, че изследваните в дисертацията проблеми са особено актуални и интересни за огромен брой учени.

Дисертацията, написана на английски език, съдържа общо **144 стр.** и се състои от **Увод, 6 глави и библиография** от **157** заглавия. Оригиналните резултати на автора се съдържат в последните 3 глави.

Общата характеристика на научните резултати на кандидата може да се формулира по следния начин:

- (a) Научните публикации, включени в дисертационния труд отговарят както на минималните национални изисквания (по чл. 2б, ал. 2 и 3 на ЗРАСРБ), така също и на допълнителните изисквания на СУ „Св. Климент Охридски“ за придобиване на образователната и научна степен „доктор“ в професионално направление 4.1 Физически науки. По-определено, те значително превишават тези изисквания. Дисертацията се основава на **3 статии** (във всички от които кандидатът има съществен принос), които са публикувани в едни от най-авторитетните

водещи световни физически списания с Q1-ранкинг: 1 – във *European Physical Journal C* и 2 – във *Physical Review D*.

- (б) Включените в дисертационния труд научни публикации не повтарят такива от предишни процедури за придобиване на научно звание и академична длъжност;
- (в) Няма доказано по законоустановения ред плагиатство в представените дисертационен труд и автореферат.

Авторефератът, състоящ се от **56** стр. и **библиография** от **82** заглавия, правилно отразява съдържанието на дисертацията.

4. Характеристика и оценка на преподавателската дейност на кандидата (ако има изискване в ПУРПНСЗАДСУ за това)

Кандидатът взема участие в подготовката и воденето на занятия в семинарите в курса по обикновени диференциални уравнения (зимен семестър 2021/22) и в семинарите в курса по термодинамика и статистическа физика (летен семестър 2021/22) към Физическия факултет на СУ.

5. Съдържателен анализ на научните и научно-приложните постижения на кандидата съдържащи се в дисертацията

Първите 4 глави 1-4 имат уводно-обзорен характер подготвяйки теоретичната и методологична (вкл. компютерно-числена) база за успешно прилагане и получаване на оригиналните резултати в глави 5-7.

Глава 1 е уводна и съдържа 4стр. , посветени на мотивацията и плана на дисертацията.

Глава 2 съдържа 10 стр. обзор на гравитационните теории, в рамките на които се изследва разглежданият клас компактни астрофизични обекти (черни дупки, неутронни звезди и пулсари, състоящи се от двойка неутронна звезда - бяло джудже, двойка черни дупки) .

По-подробно разглеждане тук е посветено на (1) ОТО; (2) скаларно-тензорни теории (СТТ) на гравитацията, в които гравитацията се описва освен с метричния тензор $g_{\mu\nu}$, с още 1 допълнително скаларно поле; мултискаларно-тензорни теории (МСТТ), в които в допълнение към $g_{\mu\nu}$ има N скаларни полета, $N > 1$, приемащи стойности в N -мерно многообразие, което в зависимост от асимптотичните условия за полетата, може да бъде топологически нетривиално; (3) скаларните Гаус-Боне (сГБ) гравитационни теории, в които допълнителното скаларно поле е куплирано към известния топологичен член на Гаус-Боне посредством (куплираща) функция на полето.

Глава 3, състояща се от 22 стр., е обзор на свойствата на компактни астрофизични обекти. Материята в разглеждания компактен обект във всички гравитационни теории (1)-(3) се описва чрез тензора на енергията и импулса $T_{\mu\nu}$ на идеална течност, чрез който се въвеждат 2 неизвестни: налягане и плътност на материята. Връзката между тях се нарича уравнение на състоянието (УНС). В неговия вид има голяма неопределеност поради факта, че процесите при плътности по-високи от тази на ядрената (барионната) материя не са известни (именно такива плътности се очакват в централната област на неутронните звезди). Тази неопределеност се повишава и от факта, че за добавката в УНС съответстваща на хипотетичната „тъмна материя“, обхващаща предполагаемо 23% от материята във Вселената, все още не се знае нищо определено. Поради това наблюдателните данни се сверяват с предсказанията от голям брой различни УНС. В дисертацията са използвани за получаването на определени физически характеристики до 53 УНС.

За получаване на структурните уравнения за компактните обекти са използвани техните предполагаеми симетрии, които опростяват уравненията на движение, следващи от действието на съответната гравитационна теория (1)-(3) и налагане на физически гранични условия. По-специално, за статични обекти се предполага сферична симетрия, за бавно въртящи се обекти – аксиална симетрия. Друг важен източник на информация за материята привлечена от компактния обект и намираща се в близост до повърхността му (наречена акреционен диск) е най-вътрешната стабилна кръгова орбита - ISCO (innermost stable circular orbit). Външната материя гравитира към обекта, ако се намира на орбита по-малка от ISCO. ISCO характеризира рентгеновото лъчение на акреционния диск. Освен ISCO, повечето модели се

описват още с характеристичните честоти на периодичните осцилации на въртящите се по кръгови орбити частици при малки радиални и ъглови пертурбации. Тези честоти се наричат радиални и вертикални епициклични честоти. В дисертацията е отбелязано качествено какви отличия могат да настъпят при структурата на акреционните дискове на компактните обекти в различните обобщени гравитационни теории.

В тази глава се прави още преглед на т.н. „универсални съотношения“ в гравитационните теории, които се използват при получаване на оригиналните резултати от автора. Тук под „универсалност“ се разбира независимост на дадено съотношение между характеристиките на неутронните звезди от различните УНС. По-рано универсални съотношения са доказани в ОТО от J. Lattimer, B. Schutz и C. Vreu, L. Rezzolla, а в обобщени гравитационни теории – също от Д. Донева, С. Язаджиев et al..

В **Глава 4**, състояща се от 20 стр., авторът синтезира основните числени методи използвани за получаването на оригиналните резултати в дисертацията. За повечето от тях той използва програмен език C или Python, оптимизирани за численото решаване на конкретните нелинейни уравнения в дисертацията. Специфично за Монте Карло веригата на Марков е използвана готова библиотека на Python. Добре е известно, че при прилагане на алгоритмите като референция, са необходими компетентни добавки според спецификата на задачите, което кандидатът е направил. Нека подчертаем, че поради силната нелинейност на задачите в ОТО и нейните алтернативни разширения, разглеждани в дисертацията, числените методи са неотменима част от тяхното решаване.

В **глави 5-7**, съдържащи оригиналните резултати, основната цел е намирането на нови физически важни и потенциално наблюдаеми ефекти, които не биха могли да се получат с методите на класическата Айнщайнова обща теория на относителността (ОТО). Заедно с това специално внимание се обръща на евентуални несъответствия между новополучени ефекти в дадена версия на разширената гравитационна теория с добре установени и наблюдателно потвърдени резултати на ОТО, което би било критерий за отхвърляне и/или по-нататъшна модификация на съответното гравитационна теория, обобщаваща ОТО.

Основните резултати на дисертанта в **глави 5-7** могат да се формулират както следва:

В **глава 5**, състояща се от 24 стр., са изследвани основните свойства на топологичните неутронни звезди, които представляват нов клас компактни астрофизически обекти в контекста на МСТТ гравитационни теории, въведен в предходни трудове на Донева-Язаджиев. По-конкретно, *тук са изследвани за първи път в литературата бавновъртящи се топологични неутронни звезди за случая на 2 различни куплиращи функции* (куплираща функция се нарича конформният фактор, който свързва метричния тезор в отправна система на Айнщайн с метричния тензор в отправна система на Йордан; в СТТ, МСТТ сГБ той е функция на скаларното поле). *За първи път в литературата са намерени инерчния момент и съответните стандартни универсални съотношения (независими от УНС) между инерчния момент, масата и радиуса на компактният обект. Освен това, за първи път в литературата числено са пресметнати орбиталните и епициклични честоти за статични и бавновъртящи конфигурации при топологични неутронни звезди, и ISCO* (най-вътрешната стабилна кръгова орбита, важна за акреция около компактният обект). Резултатите са получени и сравнени за двата типа куплиращи функции на скаларното поле. За монотонна куплираща функция не са намерени съществени наблюдателни различия с ОТО, но параметрите са ограничени в много малка област. В случая на немонотонна куплираща функция са получени съществени разлики с ОТО. Последният резултат е важен, тъй като би могъл да се използва в качеството на наблюдателна идентификация на топологичните неутронни звезди. *Резултатите са получени за 2 стойности на топологичния заряд на скаларното поле* (последният контролира асимптотиката на полето на пространствена безкрайност в статичния случай и нулева маса на полето). Този резултат дава възможност да се търсят топологични неутронни звезди с нетривиални топологични заряди – също нов резултат в литературата.

В **глава 6**, състояща се от 20 стр., за пръв път в литературата *в случая на скаларно-тензорните (СТТ) гравитационни теории са намерени нов тип универсални съотношения за величини около локалния максимум на масата за даден клон решения*. Важно е, че този нов тип универсални съотношения позволяват да се различат теории с различни параметри по начин, който не зависи от УНС. Скаларното поле в компактен обект в СТТ спрямо същия обект в ОТО, води до допълнителна вътрешна енергия, която противостои на гравитационния колапс и това позволява съществуването на обекти с по-голяма максимална маса. Анало-

гични разсъждения могат да се проведат за обосноваване на повишаване стойностите на параметъра на куплиращата функция. Те се потвърждават от числено изследване на точката на максимална маса. Този *нов клас универсални съотношения е проследен също и след като в УНС се добави принос от небарионна („тъмна“) материя*. За целта са използвани 53 УНС, като е показано, *че универсалността и в този случай се запазва*.

В **глава 7**, състояща се от 24 стр., са получени важни *нови* резултати за скаларизацията при неутронни звезди в контекста на скаларно-Гаус-Боне (сГБ) гравитационните теории. За тези теории *са намерени съществени ограничения върху параметрите на теорията* (определящи конкретния вид на куплиращата функция) от сравнения с наблюдателните данни за 3 бинарни пулсара (всеки представляващ двойка неутронна звезда-бяло джудже). Тези ограничения са получени чрез прилагането на вероятностен анализ на Bayes по метода Markov-Chain Monte-Carlo. Вероятностната функция за ограничаването на параметрите е получена от разликата между предсказаната и наблюдаваната промяна на орбиталния период на системите, породена от излъчването на гравитационни вълни. Ограниченията зависят от УНС, както и от наличието/отсъствието на маса на скаларното поле. Получените ограничения при безмасово скаларно поле са пренасят и за скаларизирани бинарни черни дупки.

От новополучените ограничения върху параметрите на скаларизирани сГБ теории съответно *са изведени ограничения за максималната маса и топологичния товар на скаларизирани сГБ черни дупки*. Тези резултати са от съществен интерес за бъдещите наблюдения на гравитационни вълни.

Много хубаво впечатление правят професионалните информационно-технически умения на кандидата да прилага съвременни числено-компютерни пакети (на основата на езици C и Python) за обработка, анализ и сравнение на теоретичните резултати с наличните наблюдателни данни.

Характерът на научните приноси на кандидата еднозначно може да се определи като:

- (а) Разработване на нови теории, хипотези и методи за изследванията в световен мащаб в областта на съвременните обобщени гравитационни теории, астрофизиката и космологията;
- (б) Обогаляване на съществуващите теоретични знания и опитни наблюдения и техни по-нататъчни приложения в указаните научни области.

Всички приноси към дисертационния труд на кандидата са публикувани, както беше отбелязано в началото, в **3** статии в списания с висок импакт фактор. За тях до предаването на дисертацията са забелязани **19** независими цитирания. И в трите си дисертационни труда със съавтори кандидатът има съществен принос по свидетелство на научния му ръководител.

6. Критични бележки и препоръки

Нямам критични забележки по същество към съдържанието на дисертацията и автореферата. Относно терминологията на български език, използвана в автореферата, бих отбелязала, че общоприети термини са „пространство-време“ и „идеален флуид“, вместо използваните „време-пространство“ и „перфектен флуид“, , но тази забележка е по скоро за внасяне на леко „гравитационно накъдряне“ върху отличното изложение. Специално държа да отбележа, че цялото изложение на дисертацията показва, че дисертантът е усвоил задълбочено както класическите аналитични резултати в сложните дебери на различните теории на гравитацията, така и най-новите постижения в тази област и отлично разбира същността на решаваните в дисертацията изследователски задачи.

7. Лични впечатления за кандидата

Качеството на научните резултати в дисертацията и професионалната автобиография на кандидата убедително го представят като млад учен с голям творчески потенциал и с очевидни перспективи за бъдеща успешна научноизследователска кариера.

8. Заключение

След като се запознах с представените дисертационен труд, автореферат и другите материали, и въз основа на направения тук по-горе анализ на тяхната значимост и съдържащите

се в тях научни приноси, **потвърждавам**, че научните постижения отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и Правилника за приложението му и съответния Правилник на СУ „Св. Климент Охридски“ за **придобиване на образователната и научна степен „доктор“**. В частност кандидатът удовлетворява минималните национални изисквания в професионалното направление и не е установено плагиатство в представените за защита дисертационен труд, автореферат и научни трудове.

Давам своята **положителна** оценка на дисертационния труд.

II. Общо Заключение

Въз основа на гореизложеното, **без колебание препоръчвам** на научното жури да присъди образователната и научна степен „доктор“ в професионално направление 4.1 „Физически науки“ на **Виктор Ивайлов Данчев**

3.05.2023 г.

Изготвила рецензията:

проф. дфзн Светлана Пачева