

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

в професионално направление 4.1. Физически науки,

научна специалност Теоретична и математическа физика

по процедура за защита във Физически факултет

на Софийски университет „Св. Климент Охридски“ (СУ)

Рецензията е изготвена от

проф. д-р Бойко Милков Михов – Институт по астрономия с НАО, БАН,

(академична длъжност, научна степен, име, презиме, фамилия – месторабота)

в качеството му на член на научното жури съгласно Заповед № РД 38-323 / 17.06.2024 г. на Ректора на Софийския университет.

Тема на дисертационния труд: „Оптични ефекти в изкривено пространство време: гравитационни лещи, сенки и поляризация на светлината“

Автор на дисертационния труд: Валентин Олегов Делийски

I. Общо описание на представените материали

1. Данни за представените документи

Кандидатът Валентин Олегов Делийски е представил дисертационен труд, Автореферат на български и английски език, а така също и задължителните таблици за Физически факултет от [Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“](#). Представени са още и: протокол за проверка на оригиналността на дисертационен труд, становище във връзка с процедурата за предотвратяване на плагиатство в дисертационни трудове, доклад за сходство (генериран от StrikePlagiarism.com), копия от публикациите, включени в дисертацията, автобиография, декларация за авторство на дисертационния труд, диплом за образователната и квалификационна степен „магистър“ и удостоверение за редовна докторантура.

Представените по защитата документи от кандидата 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

Валентин Олегов Делийски придобива образователната и квалификационна степен „бакалавър“ по Астрофизика, Метеорология и Геофизика във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“ през 2019 г., а през 2021 г. придобива образователната и

квалификационна степен „магистър“ по Теоретична и математическа физика в същия факултет. Научен ръководител на бакалавърската и магистърската тези, озаглавени „Сенки на черни дупки“ и „Гравитационни лещи“, съответно, е чл.-кор. Ст. Язаджиев. През 2021 г. В. Делийски е зачислен в редовна докторантура към катедра Теоретична физика на Физическия факултет на СУ с научни ръководители чл.-кор. Ст. Язаджиев и доц. д-р Г. Гюлчев. През 2024 г. В. Делийски е отчислен с право на защита след полагане с отличие на изпитите от индивидуалния му план. Изнесъл е три доклада по време на докторантурата – два на научни форуми и един по време на научно посещение. Кандидатът има и опит като инженер по GNC (guidance, navigation, and control) на нано-сателити във фирмата EnduroSat. Владее свободно английски език и има значителен опит в областта на Информационните технологии (програмни езици, работни среди; виж също и <https://github.com/ValentinDeliyski>, където е представен авторски софтуер използван в настоящата дисертация). Научните интереси на В. Делийски са в областта на релятивистката астрофизика и по-специално изследване на наблюдателните прояви на екзотични компактни обекти.

3. Обща характеристика на научните постижения на кандидата

Дисертационният труд е посветен на изследване на възможността за различаване на екзотични компактни обекти от черни дупки с използване сегашни и бъдещи наблюдения на екипа Event Horizon Telescope (ЕНТ). Тази възможност, от своя страна, може да ни помогне в решаването на фундаментален за съвременната физика проблем, а именно съществуването или не на екзотични компактни обекти, като пространствено-времеви тунели и голи сингулярности, които, от своя страна, възникват естествено в обобщените теории на гравитацията. В тази връзка построяването на теоретичните изображения, формирани от различни класове релятивистки обекти е от огромно значение, защото сравняването на теоретичните и наблюдателните характеристики (морфология, променливост, поляризация) на изображенията е единственият начин да потвърдим или отхвърлим даден релятивистки обект, като формиращ ги. В дисертацията е показано, че и двата гореспоменати класа екзотични компактни обекти притежават съществено различна морфология на формираните изображения спрямо тази на черни дупки на Шварцшилд. Разгледани са и поляризационните свойства на теоретичните изображения, като е показано, че индиректните изображения се влияят силно от гравитационната теория, описваща централния обект. Направен е извод, че увеличаването на броя телескопи и на работната честота на ЕНТ прави наблюденията значително по-чувствителни към наличието на изображения, формирани от екзотични обекти. Всички резултати, представени в дисертацията, са от изключителна важност не само за теорията на екзотичните компактни обекти, но и за астрофизиката, защото могат да хвърлят светлина върху природата на компактния обект в центъра на галактиките (активни или не) – в днешни дни е общоприето, че това е свръхмасивна черна дупка. Интерпретацията на наблюдаваните ЕНТ изображения с методите, предложени в

дисертацията, може да ни даде повече информация за централния обект и неговата природа (черна дупка или екзотичен клас компактен обект).

Дисертационния труд се базира на три отпечатани публикации (две журнални статии и една в сборника на конференцията „Second National Forum on Contemporary Space Research“, проведена в София) и една под рецензия. Журналните статии са публикувани в Phys. Rev. D – реномирано международно издание от квартила Q1. Тези две публикации покриват с аванс минималните национални изисквания (по чл. 2б, ал. 2 и 3 на ЗРАСРБ) и допълнителните изисквания на СУ, когато към тях се добави и статията в сборника.

Авторството и оригиналността на дисертационния труд и Автореферата са потвърдени след проверка в системата за превенция срещу плагиатството. Включените в дисертационния труд научни публикации не повтарят такива от предишни процедури за придобиване на научно звание и академична длъжност.

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

По време на докторантурата, В. Делийски е водил семинарни упражнения по „Статистическа физика“.

5. Съдържателен анализ на научните и научно-приложните постижения на кандидата съдържащи се в материалите за участие в конкурса

Дисертационния труд, представен от В. Делийски, съдържа 138 страници, 61 фигури, 16 таблици и 86 литературни източника. Разделен е на увод, обща (три глави) и техническа (три глави) части, заключение и четири допълнения. Глава 5 се базира на публикация I, глава 6 – на публикации II и III, а глава 7 – на публикация IV. Авторефератът отразява правилно съдържанието на дисертационния труд.

Общата част, глави 2 до 4, има за цел да предостави основният контекст и физическа основа на разглежданата тематика. Глава 2 представя основните закони за разпространението на електромагнитното лъчение в изкривено пространство-време (уравнения на Максвел, WKB приближение). Изведено е и приближението на геометрична оптика, в рамките на което се разглеждат всички оптически ефекти в гравитацията. Представени са също и общия вид на динамичните уравнения на светлинните лъчи (в рамките на геометричната оптика), както и ковариантното уравнение за поляризиран лъчист пренос. Динамичните уравнения на лъчите, при определени условия, допускат съществуването на кръгови фотонни орбити, които разделят летящите към централния обект фотони на такива, които се разсейват в пространството и на такива, които падат върху него. Следователно, свойствата на тези орбити определят и видимата форма на обекта за далечен наблюдател – сянка, заобиколена от фотонна сфера. В глава 3 са представени основните наблюдателни резултати на екипа ЕНТ (галактиката M87 и източника Sgr A*, разположен в центъра на Млечния път).

Разгледано е сравнението на наблюденията с GRMHD симулациите, използвани от екипа ЕНТ – най-голям проблем при интерпретацията на получените изображения е тяхната променливост. В глава 4 са представени разглежданите в дисертацията екзотични компактни обекти, които не притежават хоризонт на събитията (пространствено-времеви тунели и голи сингулярности на Джанис-Нюман-Уиникър и Гаус-Боне), както и техните основни свойства и оптически прояви. Акцентирано е върху природата на кръговите фотонни орбити и на последните стабилни орбити на масивни частици.

Техническата част, глави 5 до 7, представлява изложение на оригиналните резултати на кандидата и разглежда детайлно наблюдателната проява на два класа екзотични компактни обекти – пространствено-времеви тунели и голи сингулярности. В глава 5 е разгледана морфологията на изображението на излъчващата среда около горните класове обекти. Разглежданията са извършени за тънък акреционен диск на Новиков-Торн в статична граница – тези приближения позволяват значително да се намали броят на свободните параметри на модела и да се опростят числените пресмятания. В началото на главата детайлно е разгледана общата теория на формирането на образи в статични и сферично-симетрични пространства. Системата параметричните изрази, следваща от теорията и задаваща изображението на излъчващата среда, е решена числено с използване на кода *Mjølner*, разработен от В. Делийски. Разгледани са отделно случаите с и без фотонна сфера (само за голите сингулярности). В резултат от числените пресмятания е показано, че и двата класа екзотични компактни обекти притежават съществено различна морфология на изображенията си спрямо тази на черни дупки на Шварцшилд. Формира се централна пръстеновидна структура, разположена там, където трябва да бъде сянката на обекта (при голите сингулярности това се наблюдава само при определени стойности на параметрите). Тези морфологични отклонения могат да служат като тест за наличието на екзотичен компактен обект. Пресметнат е относителния поток на формираните изображения и са симулирани наблюдения на М87 – показано е, че морфологичните отклонения (спрямо черните дупки) на релятивистките изображения на излъчващата среда около екзотични компактни обекти трябва, в общия случай, да са достъпни за наблюдателна регистрация. В глава 6 е изследвано как природата на пространство-времето около сръхмасивните компактни обекти влияе върху поляризацията на наблюдаваното лъчение. Поляризацията характеризира структурата на магнитното поле в излъчващият регион и, което е по-важно, разпространението ѝ до наблюдателя се влияе от геометрията на пространство-времето. Този допълнителен източник на информация до голяма степен (но не изцяло) може да снесе израждането на задачата за интерпретацията на изображенията. За да се изследва влиянието на пространство-времето върху поляризацията на получените изображения е използван опростен аналитичен модел на излъчването (представен в част 6.1) и численият код *Mjølner*. За голям набор от моделни параметри са изследвани директните и индиректните поляризиращи изображения на излъчващата среда, създадени от пространствено-времеви

тунели и голи сингулярности. Установено е, че директните образи на излъчващата среда се влияят слабо от природата на пространство времето, а силно – от магнитното поле и че индиректните образи се влияят силно както от природата на пространство-времето, така и от магнитното поле. В глава 7 се търси отговор на въпроса възможно ли е със съвременната наблюдателна техника да се детектират изображения, формирани от разглежданите досега екзотични компактни обекти. За тази цел с кода *Mjølñir* се генерират симулирани идеални изображения на M87, формирани от екзотични компактни обекти, при различни стойности на параметрите на моделите. След това с кода *ehim* от идеалните изображения се генерират реални такива (т.е. как би изглеждало едно идеално изображение за наблюдател на Земята, имайки предвид параметрите на разполагаемата наблюдателна техника – разделителна способност, чувствителност и т.н.), използвайки три конфигурации от телескопи и две работни честоти. Показано е, че при увеличаването на броя телескопи изображенията, формирани от екзотични компактни обекти остават морфологично сходни с тези на черни дупки (т.е. пръстен с ясно изразена централна депресия и асиметрия на излъчването), но отношението между минималният поток в депресията, и средният такъв на пръстеновидната структура расте. Ако обаче увеличим работната честота, както се планира за ngEHT, то се наблюдава централен максимум в депресията, който може да служи като признак, че изображението е формирано от екзотичен компактен обект.

Дисертационният труд има четири допълнения, обхващащи различни аспекти от решаването на поставената научна цел. Ще отбележа допълнение А, където е представено пълното извеждане на функциите на излъчване от свръхрелятивистки заредена плазма в термодинамично равновесие и допълнение Б, където е представен разработения от В. Делийски числен код *Mjølñir* ([https://github.com/ValentinDeliyski/Mjolnir GRRT](https://github.com/ValentinDeliyski/Mjolnir_GRRT)).

Научните постижения, представени в дисертацията са от несъмнена полза при интерпретацията на настоящите и бъдещите наблюдения с инструменти от типа на EHT – в този ред на мисли научните приноси на В. Делийски могат да се характеризират като обогатяване на съществуващи знания. За важността на разглежданите в дисертацията проблеми говори и фактът, че публикациите, върху които тя се базира вече имат 20 независими цитирания, основно в реномирани международни издания (PhysRevD, JCAP, EPJC).

6. Критични бележки и препоръки

Бележките ми са от технически характер и по никакъв начин не намаляват научната стойност на дисертационния труд:

- в началото на глава 5 е записано: „Целта ни е следната: Да придобием качествена картина за морфологичните разлики на екзотичните компактни обекти спрямо черни дупки на Шварцшилд.“, докато в края на същата глава се заключава, че „Морфологичните отклонения (спрямо черни дупки на Кер) на релятивистките

образи на излъчващата среда около екзотични компактни обекти трябва, ...“.

Шварцшилд или Кер?

- на стр. 80 е записано „7.2“, а трябва да е „6.2“. На стр. 86 е записано „глава 7“, а трябва да бъде „глава 6“;
- недостатъчно точен превод на някои термини от английски на български и използването на английски термини директно на български. Например, по-правилният превод на „*For low inclinations the exotic images of wormholes are highly observationally relevant, ...*“ е „За малки наклони спрямо лъча на зрение екзотичните изображения, формирани от пространствено-времеви тунели, са лесно достъпни за наблюдение, ...“, а не „За ниски инклинации, екзотичните образи от пространствено-времеви тунели са силно релевантни за наблюденията, ...“ (цитатът е от Автореферата на английски, стр. 11).

7. Лични впечатления за кандидата

Нямам лични впечатления от В. Делийски.

8. Заключение

След като се запознах с представените дисертационен труд, Автореферат и други материали, и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържащи се в тях научни и научно-приложни 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 професионално направление 4.1. Физически науки и не е установено плагиатство в представените по конкурса дисертационен труд, Автореферат и научни трудове.

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

II. ОБЩО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на гореизложеното, **препоръчвам** на научното жури да **присъди образователната и научна степен „доктор“** в професионално направление 4.1. Физически науки на **Валентин Олегов Делийски**.

11 Септември 2024 г.

Изготвил рецензията:

(проф. д-р Бойко Михов)