

## РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за получаване на научната и образователна степен „доктор”

**Автор на дисертацията:** Калин Вилиянов Стайков,  
Редовен докторант в катедра „Теоретична физика” към Физическия факултет на Софийския университет „Св. Кл. Охридски”

**Тема на дисертацията:** „*Числено моделиране на структурата и свойствата на компактни обекти в астрофизиката*”

**Научен ръководител:** проф. дфн Стойчо Язаджиев (ФзФ-СУ)

**Научен консултант:** д-р Даниела Донева (ИЯИЯЕ-БАН и у-тет Тюбинген, Германия)

**Рецензент:** член-кор. Емил Нисимов (ИЯИЯЕ-БАН)

### 1. Общо описание на представените материали

Калин Стайков завършва успешно магистратура по специалността „Физика: Теоретична и математическа физика“ към Физическия факултет на СУ „св. Климент Охридски“ през м. октомври 2014 г. и постъпва в редовна докторантура при катедра „Теоретична физика“ на Физическия факултет през м. януари 2015 год. Впечатляващо е, че той е успял да получи значителен брой съществени научни резултати и да подготви дисертацията си за защита за рекордно къс срок – само година и 10 месеца!

Дисертацията се състои от общо 146 стр. със следното съдържание: (i) една уводна глава; (ii) четири обзорни глави (гл. 2-ра до гл. 5-та) с дефиниции на основните понятия и концепции, и по-подробно описание на теоретичните основи и изчислителните методи по съответната тематика; (iii) три глави - 6-та, 7-ма и 8-ма, които съдържат оригиналните резултати. Списъкът на цитираните литературни източници обхваща 140 заглавия.

Авторефератът адекватно отразява съдържанието на дисертацията.

Трябва да се отбележи, че въпреки сравнително кратката си научна кариера дисертантът има вече общо 8 публикации във водещи международни списания с висок импакт-фактор, от които само 4 са включени в дисертацията.

### 2. Актуалност на дисертационната тематика

Дисертацията е посветена на теоретичното изследване – с помощта както на аналитични, така и на числени методи – на компактни (силно гравитиращи) обекти в алтернативните гравитационни теории от  $f(R)$  тип. Този клас теории са систематични непротиворечиви разширения на стандартната обща теория на относителността на Айнщайн (ОТО), където  $f(R)$  е нелинейна (типично - квадратична) функция на скаларната кривина на пространство-времето за разлика от стандартната ОТО, където просто  $f(R)=R$ .

Изследването на  $f(R)$  гравитационните теории е мотивирано от проблема за описание на ефектите на т.н. „тъмна енергия“ и „тъмна материя“. Основната идея е, вместо да се въвеждат в уравненията на Айнщайн приноси от неизвестни източници в тензора на енергията-импулса на материалните полета, да се модифицира по подходящ начин приносът на самата гравитация, като по този начин възникнат нови възможности за адекватно описание на инфлационната епоха, структурообразуването и съвременното ускорено разширение в еволюцията на Вселената без да се въвеждат „мистериозните“ „тъмни“ вселенски градивни блокове.

**ИНСТИТУТ ЗА ЯДРЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА**

Стандартната Айнщайнова ОТО е подложена на многократни тестове досега и е потвърдена блестящо, обаче само при слаби гравитационни полета. От друга страна очевидно е, че голям брой фундаментални астрофизически процеси изискват познаване на динамиката в условията на силни гравитационни полета в околност на компактни астрофизични обекти (например неутронните звезди или черни дупки). Тук възниква необходимостта за изучаване на алтернативни на ОТО теории, които естествено би трябвало да я възпроизвеждат в определени граници на своите параметри отговарящи на слаба гравитация, където валидността на ОТО е доказана. От друга страна е много важно да се открият възможни нови гравитационни ефекти предсказвани и обяснявани от алтернативните гравитационни теории, в частност  $f(R)$  гравитацията, и същевременно да се разбере същината на евентуалните отклонения в резултатите за наблюдаемите величини от аналогичните резултати получени в стандартната ОТО.

Следователно, няма никакво съмнение в актуалността на изследваните в дисертацията научни проблеми, които са на предния фронт на съвременната гравитационна теория, космология и астрофизика.

### 3. Кратка характеристика на уводно-обзорната част

В уводно-обзорната част на дисертацията авторът убедително демонстрира, че много добре познава както състоянието на проблемите, така и компетентно се ориентира в постигнатите досега теоретични и наблюдателни резултати в световната литература.

В гл. 2-ра и 3-та е направен синтезиран преглед на уравненията на Айнщайн в ОТО и тяхната интерпретация и причините, които налагат въвеждането на обобщения/разширения на стандартната ОТО. Изложени са накратко основите на математическия формализъм в Айнщайновата ОТО и обобщаващите я скаларно-тензорна гравитация и  $f(R)$  гравитация (конформно еквивалентна на предната), специално за т.н. модел на Старобински, където  $f(R)=R+aR^2$ .

В гл. 4-та са описани основните свойства на компактни астрофизически обекти - по-специално статични и въртящи се неутронни и кваркови звезди, вкл. различните типове уравненията на състояния и теорията на осцилациите им в контекста на  $f(R)$  гравитацията. Разгледана е също така общата теория на орбитални и епициклични честоти на частици движещи се по затворени кръгови орбити около компактни астрофизически обекти.

В гл. 5-та е разгледана теорията на числените методи, които се използват за решаването на конкретните задачи за получаване на числени решения на моделите на неутронни звезди в специалния случай на  $R^2$ -теории на гравитацията. Тези методи са интерполации с кубичен сплайн, метод на Нютон-Рафсън, метод на Рунге-Кута, *shooting* метод за решаване на обикновени диференциални уравнения със зададени гранични условия. Обосновани са областите на приложение на методите, в които последните са ефективни.

### 4. Кратка характеристика на научните приноси

Основните оригинални резултати съдържащи се в 6-та, 7-ма и 8-ма глави могат да се формулират накратко както следва:

(i) Изследвани са непертурбативно по параметра  $a$  с помощта на числени методи  $f(R)=R+aR^2$ -моделите на статични и бавновъртящи се неутронни и кваркови звезди за случая на голям брой уравнения на състоянията. Показана е неприменимостта в дадените случаи на

**ИНСТИТУТ ЗА ЯДРЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА**

наивните пертурбативни методи по степени на  $a$ . Представени са първите самосъгласувани непертурбативни изследвания на кваркови звезди в контекста на  $f(R)$  гравитацията.

Получено е качествено съгласие при известни отклонения с Айнщайновата ОТО, в частност има съвпадение при слаба гравитация. По-значителни отклонения от ОТО има в инерционния момент на бавно въртящи се неутронни звезди.

(ii) Изследвани са пертурбации/осцилации (астеросейсмология) на неутронни и кваркови звезди в  $f(R)=R+aR^2$ -модели за различни уравнения на състоянията, параметри на звездата и осцилационни честоти. Трябва да се напомни, че именно осцилациите на неутронни звезди са един от основните източници на гравитационни вълни. Получени са редица важни гравитационно-вълнови астеросейсмологични съотношения между параметрите в теорията като пресмятанията са направени в т.н. приближение на *Cowling* ("замразена" фонова гравитация). Достигнато е интересното заключение, че астеросейсмологичните съотношения са (практически) независими както от типа на уравнението на състоянията, така и от типа гравитационна теория (стандартна ОТО или  $f(R)$  гравитация).

(iii) В рамките на проблема за квазипериодичните осцилации (типично наблюдавани в рентгеновото излъчване от пулсари и (кандидат-)черни дупки) е изследвана специфичната динамика на частица движеща се по затворена кръгова орбита около статична или бавно въртяща се неутронна или кваркова звезда в контекста на  $f(R)=R+aR^2$  гравитацията.

Получени са орбитални и епициклични честоти, а също и радиусът на последната стабилна кръгова орбита. Сравнени са получените резултати с тези от стандартната ОТО, като съществени отклонения има само при много големи стойности на параметъра  $a$ . Горните резултати се очаква да играят съществена роля за тестване на различните гравитационни теории (стандартна ОТО или алтернативните, вкл.  $f(R)$  гравитацията) при силни полета.

(iv) Дисертантът е автор на предложени и използвани нови оригинални числени кодове.

## 5. Публикации и значимост на резултатите

Измежду общо 8-те си досегашни научни труда дисертантът е включил 4 от тях в настоящата дисертация. Всички те са публикувани във водещи световни списания с висок импакт-фактор: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, *Physical Review D*, и *European Physical Journal C*. Заедно с това резултатите са докладвани на две авторитетни международни конференции (вкл. на 14-та *Marcel Grossman Meeting*) и на 3-тия Национален конгрес по физически науки.

Макар трудовете на дисертанта да са в съавторство с международно известни български и чуждестранни учени, той има несъмнено съществен принос особено в трудоемката част с приложения на числени методи. Освен това броят на тези трудове значително надвишава средния брой публикации изисквани за получаване на съответната научна степен. Също така над 70-те независими цитирания, вкл. от водещи в света експерти в дадената научна област, за сравнително кратък период от време значително надвишават средните изисквания относно цитиранията за получаване на съответната научна степен.

По отношение на значимостта на научните резултати в дисертацията определено може да се каже, че те са принос към активните широкомащабни изследвания от мощни международни научни колаборации на гравитацията в режим на силни полета, в това число и принос в бурното развитие на новата и особено актуална област на гравитационно-вълновата астрономия, вкл. създаването на прословутия *Einstein Telescope*. В крайна сметка резултатите ще бъдат и принос в по-глобален контекст към разгадаване на „мистериите“ на

**ИНСТИТУТ ЗА ЯДРЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА**

тъмната енергия и тъмната материя в еволюцията на Вселената – един кардинален проблем не само фундаментално-научен, но и мирогледен.

## 6. Забележки

Нямам критични забележки по същество освен наличието на малък брой очевидно печатни грешки, които все едно не се отразяват на последващите пресмятания и на математическата коректност на научните резултати.

## 7. Заключение

Защитаваният дисертационен труд се отличава със следните достойнства:

- Резултатите отразени в дисертацията представляват новост за дадената област, именно, те са нетривиален принос към систематичното изследване на физиката на силно гравитиращи (компактни) астрофизически обекти в контекста на обобщените гравитационни теории.
- В дисертацията се решават актуални нетривиални проблеми, които са от съществено значение за развитието на дадената област в условията на силна международна конкуренция.
- Дисертантът демонстрира много добро познаване на литературата, задълбочено вникване и разбиране на основните проблеми и задачи за решаване по дадената тематика.
- Дисертантът показва професионални умения при боравене със сложен съвременен математичен и теоретичен апарат. Той също така демонстрира способности за създаване на ефективни програмни кодове с решаващо значение при получаването на основните научни резултати.
- Публикациите на резултатите в дисертацията са в най-елитните съвременни световни физически списания и за относително кратък период от време са получили впечатляващ брой независими цитирания, вкл. от водещи чуждестранни учени.

Въз основа на горните преценки напълно определено считам, че представената дисертация е на много високо научно ниво и удовлетворява със запас изискванията за получаване на съответната научна степен. Нещо повече – от личен опит преценявам, че тази дисертация достойно може да бъде защитена в произволен водещ в света чуждестранен университет или научен център. Няма съмнение, че Калин Стайков е вече изграден млад учен с много добри перспективи за развитие и успешна бъдеща научна кариера. Поради това без колебание препоръчвам на високоуважаемото научно жури към Физическия факултет на СУ „св. Кл.Охридски“ да присъди на Калин Вилиянов Стайков научната и образователна степен „доктор“.



19.11.2016 г.

член-кор. Емил Рафаелов Нисимов