

# НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо 11.09.2019. године на десетој седници Наставно-научног већа Физичког факултета универзитета у Београду одређени у комисију за преглед и оцену докторског рада *Detection of quantum correlations* (*Детекција квантних корелација*) Александре Димић, студенткиње докторских студија Физичког факултета, подносимо следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. Биографија

Александра Димић рођена је 17. маја 1991. године у Загребу. Основну школу, а потом Математичку гимназију завршила је у Београду 2010. године. Исте године уписала се на Физички факултет Универзитета у Београду, смер Теоријска и експериментална физика. Основне студије је завршила 2014. године са просеком 10, и уписала мастер студије које је завршила 2015. године са просеком 10. Мастер рад је израђен под менторством проф. др Ђорђа Спасојевића и проф. др Милорада Кураице. Школске 2012/2013 била је стипендисткиња фонда "Проф. др Ђорђе Живановић", а потом, у периоду од 2013. до 2015. године, стипендисткиња Фонда за младе таленте Републике Србије – Доситеја. Након завршених мастер студија проводи пет месеци на Институту за фотонику у Барселони, на стручном усавршавању у групи за Експерименталну квантну информацију, под руководством професора Моргана Мичела. Докторске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, смер Квантна, математичка и нанофизика, уписује 2015. године. Положила је све испите предвиђене програмом и марта 2018. године одбранила је тему дисертације пред Колегијумом докторских студија. Од марта 2016. године запослена је на Физичком факултету као истраживач приправник, а у звање истраживач сарадник изабрана је у марту 2019. године.

Досадашња истраживања кандидаткиње спадају у научну област квантна физика, ужа област, квантна информатика. До сада је објавила четири научна чланка у међународним часописима (од којих су два категорије М21, а два категорије М21а) чије је укупан импакт фактор 38.69 (сви чланци су импакт фактора већег од један; појединачне категорије и импакт фактори су дати у списку публикација). Укупан број цитата које кандидат има је 10 без цитата аутора и коаутора. Ангажована је на пројекту "Графитне и неорганске структуре ниске димензионалности" евиденциони број 171035 Министарства провете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

## 2. Опис докторског рада

### 2.1. Тема и циљеви

Дисертација је урађена под руководством др Боривоја Дакића, доцента, запосленог на Факултету за физику Универзитета у Бечу и др Милана Дамњановића, редовног професора Физичког факултета Универзитета у Београду. Ментори испуњавају услове Физичког факултета за руковођење изработом докторске дисертације и аутори су великог броја радова из области квантне и математичке физике који су објављени у врхунским међународним часописима и представљени на међународним и домаћим конференцијама.

Основна тема истраживања обухваћена докторском тезом је ефикасна и поуздана детекција квантних корелација, са нагласком на квантну сплетеност и квантну нелокалност. Један од основних задатака јесте конструкција нових метода и квантно-информатичких протокола за верификацију квантне сплетености код великих квантних система (сачињених од великог броја квантних честица). Имајући у виду да су скоро све постојеће методе детекције базиране на мерењу средњих вредности одређених физичких величина (опсервабли), њихова практична примена заснива се на прикупљању огромне количине резултата мерења, што је велики ограничавајући фактор код великих квантних система. Отуда произилази и неопходност потпуно нових метода које би се могле адекватно применити у оваквим случајевима. У том смислу, као основна идеја за конструкцију нових метода, представљен је модел детекције базиран на случајном узорковању. Са теоријског становишта, читав скуп квантних стања подељен је на две различиве класе, тј. сепарабилна (класична) и квантно-корелисана (сплетена) стања. Задатак овог новог метода је практична (експериментална) проверивост овакве поделе код великих квантних система. У случају квантне нелокалности, ова подела се односи на такозване локалне (класичне) и нелокалне (квантне) корелације. Као конкретни циљеви истраживања, представљени су различити примери детекције код такозваних кластер стања (која су од изузетне важности за развој квантних технологија), основних стања локалних Хамилтонијана (овим су обухваћене све класе релевантне за физику), као и стања са ниским степеном сплетености (такозвана  $k$ -продуцибилна стања). Потом, други важан задатак представљен у овој тези јесте превођење стандардних детекционих метода (као што су метод *witness* оператора и детекција нелокалности помоћу Белових неједнакости) у ефикасну пробабилистичку процедуру базирану на поменутом методу случајног узорковања. Сви циљеви истраживања имају јасан и добро дефинисан практични аспект, што је и демонстрирано у самој тези путем конкретне експерименталне провере остварене помоћу корелисаних фотонских система.

Трећи важан циљ ове тезе је испитивање особина дистрибуција случајних варијабилних генерисаних помоћу квантних мерења. Као основна хипотеза намеће се идеја да све дистрибуције добијене помоћу сепарабилних стања могу поседовати фундаментално другачије особине од оних које су генерисане из сплетених стања. Специфичност таквог понашања одражава се кроз брзину и степен конвергенције којом се релативна фреквенција (резултата мерења) стабилизује у вероватноћу.

## 2.2. Садржај и резултати

Дисертација је подељена у пет глава, уз увод и закључак. Поред тога постоје и додаци: први посвећен техничким детаљима извођења, а други прегледу елементарних појмова из теорије вероватноће.

У првој глави, односно уводу, дата је мотивација и образложена неопходност проналажења нових метода за детекцију квантних корелација код великих квантних системима. У другој глави урађена је рекапитулација основних појмова који се користе у теорији квантне информације и уведен је такозвани операциони приступ квантом експерименту. Поред тога, уведен је појам квантних корелација, са посебним нагласком на квантну сплетеност и квантну нелокалности. Трећа глава посвећена је стандардним методама детекције квантне сплетености. Посебан осврт дат је на метод *witness* оператора. Објашњени су недостаци стандардних метода детекције као и немогућност њихове практичне примене код великих квантних система. У четвртој глави изложени су главни резултати ове докторске дисертације. Уведен је модел базиран на методу случајног узорковања. Детаљно је објашњен принцип овог пробабилистичког метода, као и механизам за адекватну интерпретацију добијених резултата. Први корак представља дефинисање погодних мерења која треба извршити над датим квантним системом како би корелације које систем поседује биле лако доступне тј. уочљиве у резултатима мерења. Одабрана мерења морају бити таква да ниједно сепарабилно стање не може са максималним учинком да репродукује резултате које би дало сплетено квантно стање. Користећи ту чињеницу, мерења која треба извршити у експерименту изабрана су путем случајног узорковања, а према унапред задатој расподели. Такав начин одабира мерења вишеструко смањује вероватноћу да у сваком пролазу експеримента добијемо задати резултат код свих сепарабилних стања (насупротив сплетеним стањима). Сам метод је општег карактера и даје одличне резултате када се примени на велике квантне системе. Штавише, уколико је систем довољно велики, мерење само једне копије квантног стања може послужити за детекцију квантне сплетености на високом нивоу поверења (са великом вероватноћом). Овакво понашање не постоји код малих квантних система. Детекциони протокол је детаљно описан у поглављу 4.1. Модел је успешно примењен на различите класе сплетених стања, као што су кластер стања, основна стања локалних Хамилтонијана, као и стања са ниским степеном сплетености (к-продуцибилна стања). Најзад, објашњена је резистентност развијеног метода у присуству шума.

У поглављу 4.2. описана је генерализација претходног метода и детаљно је описан начин превођења стандардних метода, тј. метода *witness* оператора, као и Белових неједнакости, у ефикасну пробабилистичку процедуру. Конкретна реализација подразумева локална мерења, што је релевантно са практичног становишта. Применљивост овог протокола проверена је путем експеримента помоћу фотонског граф-стања које се састоји од шест квантних битова. Резултати мерења су у потпуности потврдили теоријска предвиђања.

У петој глави је приказана директна примена развијеног метода на детекцију квантне нелокалности. Дискутована је примена протокола на такозвани *self-testing* модел, као и

поређење између *device-dependent* и *device-independent* метода верификације квантних стања. Дати су примери таквих случајева. За детекцију нелокалности и *self-testing* дат је пример линеарног кластер стања као и *GHZ (Greenberger-Horne-Zeilinger)* стања.

У шестој глави се разматра проблем понашања квантних случајних варијабли реализованих путем генералних квантних мерења. Показано је да се у случају сепарабилних улазних стања, добијена дистрибуција резултата мерења понаша као мешавина нормалних дистрибуција, што представља централну граничну теорему за квантне случајне варијабле. Са друге, уколико су улазна стања квантно сплетена, дати су примери потпуно другачије статистике, што се одражава кроз брзину конвергенције релативне фреквенције (добијених резултата), која је значајно већа. Конкретан пример оваквог понашања конструисан је помоћу такозваног Дике стања (*Dicke state*). Дискутована је примена оваквог и сличних протокола у квантној метрологији и детекцији квантних корелација.

У седмој глави извршена је рекапитулација добијених резултата.

### 3. Списак објављених радова

Из докторске тезе произашли су чланци бр. **1 - 3**, уз напомену да је теоријска анализа из публикације бр. **1** спроведена од стране аутора дисертације (у сарадњи са ментором), док је експериментални део рада урађен под руководством проф. др Филипа Валтера на Факултету за физику, Универзитета у Бечу.

#### Публиковани радови

1. V. Saggio, A. Dimić, C. Greganti, L. A. Rozema, P. Walther, and B. Dakić, Experimental few-copy multipartite entanglement detection. *Nature Physics* **15**, 935–940 (2019),
2. A. Dimić and B. Dakić, Single-copy entanglement detection. *npj Quantum Information* **4** (1), 11 (2018),
3. A. Dimić and B. Dakić, On the central limit theorem for unsharp quantum random variables. *New J. Phys.* **20**, 063051 (2018),
4. V. G. Lucivero, A. Dimić, J. Kong, R. Jimenez-Martinez, and M. W. Mitchell, Sensitivity, quantum limits, and quantum enhancement of noise spectroscopies. *Physical Review A* **95** (4), 041803 (2017).

### 4. Провера оригиналности докторске дисертације

Провера оригиналности ове тезе извршена је применом програма iThenticate. Највећи део прекривања је из радова које је кандидаткиња објавила у сарадњи са ментором и општим места и података што је у складу са чланом 9. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду.

## ЗАКЉУЧАК

Из наведеног произилази да предложени рад *Detection of quantum correlations* (*Детекција квантних корелација*) Александре Димић, дипломираног физичара, доноси оригинални допринос у развоју нових практичних метода и примена квантне информатике и квантних технологија. Узимајући у обзир савременост теме, као и чланке који су произашли из ове дисертације, **предлажемо Наставно-научном већу Физичког факултета да одобри јавну одбрану ове докторске тезе.**

Београд 13.09.2019.

др Боривоје Дакић, Доцент,  
Факултет за физику, Универзитет у Бечу

др Милан Дамњановић, Редовни професор,  
Физички факултет, Универзитет у Београду

др Антун Балаж, Научни саветник,  
Институт за Физику у Београд

др Иванка Милошевић, Редовни професор,  
Физички факултет, Универзитет у Београду

др Татјана Вуковић, Ванредни професор,  
Физички факултет, Универзитет у Београду