NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU FIZIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

Pošto smo na VI sednici Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu održanoj 28. marta 2018. godine određeni za članove komisije za ocenu ispunjenosti uslova i opravdanosti predložene teme za izradu doktorskog rada Aleksandre Dimić pod nazivom "Detekcija kvantnih korelacija" ("Detection of quantum correlations") i određivanje mentora disertacije, podnosimo sledeći

IZVEŠTAJ

1 Biografski podaci o kandidatu

Aleksandra Dimić rođena je 1991. godine u Zagrebu. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Beogradu. Osnovne studije fizike, smer Teorijska i eksperimentalna fizika, završila je 2014. godine na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu sa prosečnom ocenom 10. Master studije, završila je takođe na Fizičkom fakultetu, sa prosečnom ocenom 10. Master rad pod nazivom "Magnetne i optičke osobine ferofluida kobalt-ferita" odbranila je 2015. godine pod rukovodstvom prof. dr Đorđa Spasojevića i prof. dr Milorada Kuraice. Nakon završenih master studija provela je šest meseci u Barseloni, na Institutu za fotoniku u grupi za Eksperimentalnu kvantnu informaciju, pod mentorstvom prof. dr Morgana Mičela. Doktorske studije na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, modul Kvantna, matematička i nano-fizika, upisala je 2015. godine i trenutno je student treće godine. Položila je sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija sa prosečnom ocenom 10. Tokom leta 2017. godine provela je tri meseca na stručnom usavršavanju na Institutu za kvantnu optiku i kvantnu informaciju u Beču, kao stipendista Austrijske agencije za mobilnost (OeAD).

Aleksandra Dimić je zaposlena kao istraživač pripravnik na projektu ON171035 "Grafitne i neorganske strukture niske dimenzionalnosti" Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Učestvovala je na nekoliko letnjih škola iz oblasti kvantne optike i kvantne informacije u Beču, Beogradu i na Krfu. Aleksandra Dimić drži računske vežbe iz predmeta: Metode matematičke fizike, Teorijska fizika plazme i Elektromagnetizam na Fizičkom fakultetu u Beogradu.

2 Zadaci doktorske teze, naučna aktivnost kanditata i očekivani rezultati

Aleksandra Dimić se u okviru pripreme doktorske disertacije, pod rukovodstvom dr Borivoja Dakića, bavi istraživanjem iz oblasti kvantne informatike. U širem smilsu, tema doktorskog radu su kvantne korelacije, tj. kvantna zapletenost (eng. *entanglement*), njena manifestacija, jačina i merljivost, kako u prirodnim, tako i u kontrolisanim (laboratorijskim) uslovima. Tokom prethodne dve decenije, ova tematika dospela je u sami fokus istraživanja iz oblasti kvantne informatike, ponajviše usled intenzivnog razvoja takozvanih kvantnih tehnologija (Dowling, J. P., and Milburn, G. J., *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A: Math., Phys. Eng. Sci.* **361**, 1655, 2003), kao što su kvantno računarstvo, kvantna komunikacija, i u najširem smislu kvantno procesiranje informacije. Za razliku od konvencionalnog (klasičnog) pristupa, gde se infomacija kodira, obrađuje i dekodira pomoću bitova, kvantna mehanika pruža mogućnost jedne nove i "superiornije" obrade podataka pomoću elementarnih kvantnih sistema zvanih kjubiti (eng. *qubit*). Jedan od osnovnih preduslova za ovaj novi vid procesiranja informacije jeste postojanje takozvane kvantne zapletenosti među kvantnim sistemima (kjubitima), tj. jednog novog tipa korelacije među sistemima koji ne postoji u klasičnoj fizici.

Problem karakterizacije kvantne zapletenosti kod malog broja kvantnih sistema je dobro studirana i razrađena tema, kako sa teorijske, tako i sa eksperimentalne tačke gledišta. Tokom prethodnih godina, razvijene su mnogobrojne metode za (praktičnu) detekciju kvantne zapletenosti koje su postale standardna tehnika pri izvođenju kvantnih eksperimenata (Gühne, O., and Tóth, G., *Phys. Rep.* **474**, 1, 2009). Nažalost, primenjivost standardnih metoda kod višečestičnih sistema izostaje iz krajnje praktičnih razloga. Naime, kako broj čestica koje konstituišu kvantnu zapletenost raste, to je broj merenja potrebnih za pouzdanu detekciju kvantih korelacija sve već i i veći, da bi u jednom momentu prerastao tehničke mogućnosti za izvodljivost takvog eksperimenta. Primera radi, skorašnji eksperiment kojim je pokazano postojanje kvantne zapletenosti između 10 fotona (Wang, X. L. et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 210502, 2016), demonstrirano je da se jedna kopija deseto-fotonskog stanja preparira u proseku svakih 5 minuta. Kako pouzdana detekcija kvantne zapletenosti pomoću standardnih metoda zahteva veliku kolčinu eksperimentalnih podataka, dužina takvog eksperimenta meri se u danima. Procene pokazuju da bi sličan eksperiment koji uključuje svega dva fotona više, trajao mesecima (svaki naredni fortonski par redukuje frekvenciju preparacije višečestičnog stanja za $1-2$ reda veličine), što prevazilazi tehničke mogućnosti za njegovu realizaciju (Dimić, A., and Dakić, B., *npj Quantum Information*, **4**(1), 11, 2018). Iz navedenog se može zaključiti da će praksa nove generacije kvantnih eksperimenata zahtevati nove metode koje bi omogućile pouzdanu detekciju unutar tehnoloških mogućnosti. Sa druge strane, kvantna mehanika je u svojoj srži verovatnosna teorija i njena empirijska verifikacija zahteva veliku količinu eksperimentalnih podataka (pouzdanu statistiku).

Sa takvog stanovišta, otvara se sledeće pitanje koje je od opšte važnosti: da li je praktično izvodiva eksperimentalna provera (novih) efekata koji uključuju kvantnu zapletenost velikog broja sistema? Ovo su opšta pitanja na kojima se bazira naučni rad kandidata.

Doktorska teza se bavi detekcijom kvantne zapletenosti kod višečestičnih kvantnih sistema. Sama teza ima dva askpekta: praktični i teorijski. Unutar praktičnog dela, njeni osnovi zadaci su pronalazak novih metoda za pouzdanu detekciju kvantne zapletenosti. Za razliku od standardnih metoda baziranih na prikupljanju velike količine podataka u ponovljenim merenjima, osnovni zadatak ove teze jeste izvođenje novih metoda baziranih na principima slučajnog uzorkovanja (Tille, Y. Sampling Algorithms, Springer Series in Statistics, 2006), mašinskog učenja (Biamonte, J. et al., *Nature* **549**, 195202, 2017), i metoda "jedne kopije" (Dimić, A., and Dakić, B., *npj Quantum Information*, **4**(1), 11, 2018). Što se tiče teorjiskog aspekta teze, on se bavi problemom konvergencije kvantnih slučajnih varijabli i izvođenjem centralnih graničnih teorema u slučajevima gde kvantna zapletenost igra nezaobilaznu ulogu. Oba aspekta teze pokazana su u sledećim radovima:

- Dimić, A. and Dakić, B., *Single-copy entanglement detection*, npj Quantum Information **4(1)**, 11(2018),
- Dimić, A. and Dakić, B., *On the central limit theorem for unsharp quantum random variables*, New Journal of Physics **20**, 063051 (2018).

Unutar prvog, navedenog rada, pokazana je mogućnost pouzdane detekcije kvantne zapletenosti kod velikih sistema pomoću svega jedne kopije kvantnog stanja. Ovim je praktično pokazano da je detekcija moguća čak i kada su potrebni resursi svedeni na logički minimum (jedna kopija). Metoda se zasniva na kombinaciji slučajnog uzorkovanja (Tille, Y. Sampling Algorithms, Springer Series in Statistics, 2006) i metoda kvantne komunikacije (Buhrman, H. et al., *Rev. Mod. Phys.* **82**, 665, 2010) i uspešno je primenjena na slučajeve takozvanih "klaster" stanja (Briegel, H. J., and Raussendorf R. , *Phys. Rev. Lett.* **86**, 910, 2001) i osnovnih stanja lokalnih Hamiltonijana. U narednom koraku, očekuje se generalizacija ovog metoda na druge klase višečestičnih kvantnih stanja, kao što su stanja sa "slabim" korelacijama koja igraju važnu ulogu u fizici višečestičnih sistema i teoriji kondenzovanog stanja (Anshu, A., *New Journal of Physics* **18**, 083011, 2016). Drugi navedeni rad, bavi se problemom kovergencije kvantnih slučajnih varijabli generisanih pomoću kvantne zapletenosti. Pokazano je da kvantna zapletenost dramatično menja oblik centralnog graničnog teorema (CGT). Pored opšteg značaja ovog rezultata, pokazan je praktični aspekt i važnost zakona velikih brojeva kod takozvane kvantne metrologije (V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 010401, 2006). Kao naredni korak,

očekuje se izvođenje novih oblika CGT-a koji bi omogućili vidljivost i manifestaciju kvantne zapletenosti na makroskopskoj skali.

2.1 Objavljeni naučni radovi kandidata

1. Lucivero, V. G., Dimić, A., Kong, J., Jimenez-Martinez, R., and Mitchell, M. W., *Sensitivity, quantum limits, and quantum enhancement of noise spectroscopies*, Physical Review A **95(4)**, 041803 (2017),

2. Dimić, A., and Dakić, B., *Single-copy entanglement detection*, npj Quantum Information **4 (11)**, (2018),

3. Dimić, A., and Dakić, B., *On the central limit theorem for unsharp quantum random variables*, New Journal of Physics **20**, 063051 (2018).

2.2 Učesšće na konferencijama i letnjim školama

1. "CoQuS 2016", Letnja škola: Kompleksne kvantne strukture, Septembar 2016, Beč, Austrija,

2. "YQIS 2016", Međunarodna konferencija mladih kvantnih informatičara, Oktobar 2016. Barselona, Španija,

3. "COST Space", Letnje škole: Kvantna struktura prostor-vremena i gravitacije, Beograd 2016. i Krf, Grčka 2017. godine.

3 Zaključak

Gore navedeni radovi, pokazuju da je kandidat svojim naučinim aktivnostima opravdao ciljeve i ispunio uslove za pristupanje izradi doktorske disertacije. Takođe, treba napomenuti da je kandidat odbranio temu doktorskog rada na Kolegijumu doktorskih studija u martu 2018. godine. Na osnovu izloženog, zaključujemo da je tema disertacije značajna, da se uklapa u savremena istraživanja u teorijskoj fizici i da je dobro definisana, kao i da su očekivani naučni doprinosi teze relevantni. Kao mentora ove doktorske teze, komisija predlaže dr Borivoja Dakića.

U Beogradu, 10.09.2018.

prof. dr Maja Burić

redovni profesor Fizičkog fakulteta

prof. dr Milan Damnjanović

redovni profesor Fizičkog fakulteta

dr Borivoje Dakić

Naučni saradnik,
Institut za kvantnu optiku i kvantnu informaciju,
Austrijska akademija nauka, Beč