

УНИВЕРЗИТЕТ	ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ПРИМЉЕНО	26.10.2016
Орг. јед.	5001
02	970/3 - -

Истхит согласан  
26/10/2016.

*Милошевић*

**НАСТАВНО – НАУЧНОМ ВЕЋУ ПРИРОДНО – МАТЕМАТИЧКОГ ФАКУЛТЕТА  
У КРАГУЈЕВЦУ**

**Предмет:** Извештај комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Момира Арсенијевића.

Одлуком наставно-научног већа Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу, број 690/XI-2, одржаног дана 31. 8. 2016. године и одлуком већа за природно-математичке науке, број IV-01-837/22, одржаног дана 14. 9. 2016. године одређени смо за чланове комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом

**ДИНАМИКА КВАНТНИХ ПОДСИСТЕМА И КОРЕЛАЦИЈА У ДВОДЕЛНИМ  
КАНОНСКИМ СТРУКТУРАМА**

кандидата Момира Арсенијевића, асистента на Природно-математичком факултету у Крагујевцу. Након прегледа докторске дисертације, а у складу са Статутом Факултета, чл. 51, и Статутом Универзитета, чл. 48, подносимо Наставно-научном већу Природно-математичког факултета и већу универзитета следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

о урађеној докторској дисертацији кандидата Момира Арсенијевића.

Докторска дисертација кандидата Момира Арсенијевића изложена је на 149 страна, а у оквиру текста приказане су 3 слике и укупно су цитиране 94 библиографске јединице.

Поднети рад се састоји из два дела, УВОДНИ ДЕО и ИСТРАЖИВАЧКИ ДЕО И РЕЗУЛТАТИ. У првом делу су приказана општа разматрања из различитих области

савремене квантне физике од интереса за рад и монографског је карактера без оригиналног научног доприноса. Други део рада представља оригинални научни допринос кандидата.

### **Преглед садржаја урађене дисертације**

Део ОПШТА РАЗМАТРАЊА је монографског карактера, уводи основне појмове и даје преглед стања у вези са темом рада, такозваним квантним структурама, и нема оригиналног научног доприноса. Састоји се од првих пет глава у којима су уведени појмови из различитих области савремене квантне физике као и представљени основни постојећи резултати који чине полазну основу ове дисертације.

У првој глави, под називом „*Увод у квантне структуре физичких система*“, представљен је нови правац истраживања, практично нова област савремене кванте физике, такозване, „студије квантних структура“ у оквиру којих су теме истраживачког рада ове дисертације. Општи задатак – „растављање“ сложених система на подсистеме – представљен је у пуној општости за шта постоји интерес у практично свим постојећим областима савремене квантне физике – како у области њеног заснивања и примене, тако и у области тумачења (интерпретације) квантне теорије. Дат је преглед постојећих резултата, истакнута мотивација, задаци и садржај дисертације.

У другој глави, под називом „*Појам и врсте квантних корелација*“, уведен је појам „квантне корелације“ преко дефиниција основних познатих врста корелација: квантне сплетености (quantum entanglement), квантног дискорда и класичних корелација, како у чистим тако и у мешаним квантним стањима. За мешана стања дефиниције су дате преко једнозначне везе корелација са одговарајућим обликом мешаног стања. За мешана стања без квантне сплетености (такозвана, „сепарабилна“ стања) уведена су и примерима илустрована, такозвана, квантно-квантна, квантно-класична и класично-класична стања. Дат је и кратак преглед квантификатора квантних корелација од интереса за дисертацију.

У трећој глави, под називом „*Основни појмови и методи квантне теорије отворених система*“ уведен је и илустративним примерима представљен појам отворености квантног система. Задатак изучавања динамике отворених система је посебно наглашен у оквирима, тренутно доминантног, такозваног, пројекционог метода Накациме-Цванцига у извођењу диференцијалног облика динамике отворених квантних система. Уведена је тренутно најшире коришћена (временски зависна) дефиниција Марковљевих

квантних процеса, како у интегралном облику Крауса, тако и у диференцијалном облику у најопштијем случају који као специјалан случај обухвата и историјски познат, Линдбладов облик, мастер једначине за временски хомогене Марковљеве процесе.

Четврта глава, под називом „*Неки резултати студија квантних структура*“, даје преглед, као и критички осврт, неких општих резултата квантних структурних студија за дводелне квантне структуре. Посебан нагласак је стављен на оквире универзално важеће и комплетне квантне теорије као и на процес квантне декохеренције као средишњи физички процес од интереса за заснивање квантне теорије. Кратко су представљени резултати „паралелног одвијања декохеренције“, затим једног метода за избегавање квантне декохеренције у квантном „хардверу“, и посебно наглашен појам, такозване, релативности квантне сплетености за чиста стања у дводелним квантним структурама. Повезивање ових садржаја са садржајем прве главе ближе одређује задатке дисертације и заокружује њен први део.

У петој глави под насловом „*Појам локалног времена*“ представљена је нова парадигма, такозваног, локалног времена - схема локалног времена (СЛВ). У сложеном систему у којем се неки подсистеми могу сматрати макар приближно затвореним (динамички описани Шредингеровим законом), хамилтонијани таквих, затворених, система генеришу локално време које независно тече од других таквих система. Локално време није фиксирано за дати систем: довољно јака интеракција са неким другим локалним системом води формирању новог затвореног (локалног) система и тиме води почетку новог локалног времена за ту новонасталу целину. Представљен је основни скуп правила за дефинисање локалног времена који се тиче структуре локалног система и његовог хамилтонијана, и не зависи од било чега другог. Тиме време у квантној теорији престаје да буде универзално (глобално), постаје последица динамике као основног појма („примитива“) СЛВ-а те није више фундамент квантне теорије. Другим речима, време постаје појавна („емергентна“) особина локалног, тј., затвореног система за коју задатак квантовања више, чини се, нема смисла. Локално време остаје по својој математичкој природи реалан број, тј., није у питању „оператор“ времена. У овој схеми, славна Вилер-ДеВитова једначина добија посебно тумачење: подсистеми свемира каквог знамо имају своја, локална, времена, али целина, тј., сам свемир, нема једнозначно дефинисано време.

Други део дисертације под називом ИСТРАЖИВАЧКИ ДЕО РАДА И РЕЗУЛТАТИ представља оригинални научни допринос аутора. Резултати научног истраживања су приказани у главама 6 – 11.

У шестој глави под називом „*Релативност квантног дискорда*“ показано је да релативност сплетености има за последицу (то јест, имплицира) релативност квантног дискорда као квантно-информатичке мере квантних корелација која уопштава квантну сплетеност. Физичке последице овог математичког резултата су разноврсне и далекосежне. На основном физичком нивоу постаје јасно да, насупротив уобичајеном ставу и интуицији, корелације нису особина квантног система, нити квантних стања система, већ заправо последица структурирања квантног система. Другим речима, за сваки сложени систем, и свако стање тог сложеног система, постоји дводелна структура која има ненулти квантни дискорд. Са оперативне, на пример квантноинформатичке, тачке гледишта, релативност дискорда указује да, за разлику од уобичајене праксе, никакви протоколи посебне припреме стања нису неопходни, већ је погодан избор опсервабли, које су адаптиране на одабрану дводелну структуру, довољан за квантноинформатичко процесирање – уколико је за то процесирање довољан, или пожељан, ненулти квантни дискорд. Интерпретацијски аспекти овог резултата још нису изучени, али је већ сада јасно да релативност квантних корелација (која је сада королар универзално важеће и потпуне квантне теорије и обухвата и сплетеност, и дискорд) уводи нови дискурс, или дискурсе, у област интерпретација на свим местима на којима су квантне корелације, а са њима и квантна нелокалност (то јест, несепарабилност), од интереса. Ово поглавље садржи оригинални научни допринос кандидата, који је резултовао публикацијом:

М. Dugić, М. Arsenijević, Ј. Jeknić-Dugić, **Quantum correlations relativity for continuous variable systems**, Science China-Physics, Mechanics and Astronomy **56**(4), 732-736 (2013).

У седмој глави ове дисертације под називом „*Нека ограничења пројекционог метода Накациме-Цванцига*“ примењена је релативност сплетености на анализу математичког извођења мастер једначина које имају особину локалности у времену, што се обично заснива на пројекционом методу Накациме-Цванцига. У раду је нагласак стављен на класичну интуицију: ако одуземо, или додамо, једну једину „микро“-честицу неком макроскопском (многочестичном) систему, очекујемо да ће промене бити

занемарљиве, то јест, да је информација коју поседујемо о макроскопском систему пре овог поступка довољна да се извуче (или дедукује) информација о том, практично истом, систему и после описаног поступка. Међутим, испоставља се да релативност сплетености у потпуности одбацује овакву могућност. Математички, то је последица у раду доказаног некомутирања и међусобног преклапања пројектора који у методу Накациме-Цванцига одговарају различитим структурама које постоје пре и после описаног поступка. У терминима теорије информације: информација коју можемо добити на основи мастер једначине за систем пре поступка, није довољна да опише систем после поступка придруживања, или одузимања неке честице, која и сама представља физички систем и тиме учествује у дефинисању структуре макроскопског тела. Закључак који следи је лоша вест по нашу класичну интуицију: описивање система после поступка се мора засновати на мастер једначини која се мора извести независно од мастер једначине која важи за структуру пре поступка. Имајући у виду резултат Главе 5, аналогни закључак важи и за структурирано окружење, то јест, физичку ситуацију у којој је систем у додиру само са малим делом окружења са којим чини отворени систем описан мешаним стањем – по аналогији са стандардним моделом квантног мерења. Ово поглавље садржи оригинални научни допринос кандидата, који је резултовао публикацијом:

M. Arsenijević, J. Jeknić-Dugić, D. Todorović, M. Dugić, **Entanglement relativity in the foundations of the open quantum systems theory**, Chapter 2 in *New Research on Quantum Entanglement*, NY: Nova Science Publishers, 2015, pp. 99-116.

У глави осам ове дисертације под називом „*Асимптотске структуре пара неинтерагујућих модова*“ разматран је пар неинтерагујућих (декуплованих) модова – еквивалентно пар неинтерагујућих хармонијских осцилатора – који су засебно у интеракцији са својим окружењима, која међусобно не интерагују. Од интереса је временска промена стандардних одступања оригиналних и алтернативних („колективних“) степени слободе за разматрани модел. Стандардна одступања су рачуната у Хајзенберговој слици, у интегралном облику динамике познатом као Краусова декомпозиција комплетно-позитивне динамичке мапе. Уопштење Бејкер-Хауздорфове леме (које су дали Мендаш и Поповић) даје изразе за оригиналне степене слободе. Чињеница да су модови (осцилатори) декупловани поједностављује рачун у смислу ограничења истакнутих у поглављу 7, па је отуда познавање мастер једначине за

оригиналне степене слободе довољно. Стандардна одступања за алтернативне степене слободе (тј., алтернативну структуру) носе нетривијалну временску зависност. Међутим, у асимптотском лимесу (бесконечно време), које је формални лимес теорије отворених система, а који је применљив на различите временске скале и процесе (декохеренција, релаксација, термализација), добија се да оригинални степени слободе осцилатора задовољавају услов минималне неодређености. Тај резултат еквивалентан је закључку да је, у терминима оригиналне структуре, стање система производ, такозваних, „кохерентних стања“ подсистема чија гаусијанска природа даје тражену класичност структуре – „кохерентна стања“ су у теорији отворених система и декохеренције позната као најкласичнија стања у Хилбертовом простору „континуалних“ система. Овиме је добијен један од малобројних резултата који указује на то да за отворене системе могу постојати „привилеговане“ структуре и да су оне последица утицаја окружења, са једне, као и нови увид, да „класичност“ (баш као и корелације) није особина (отвореног) квантног система, већ његове структуре, са друге стране. Ово поглавље садржи оригинални научни допринос кандидата, који је резултовао публикацијом:

M. Arsenijević, J. Jeknić-Dugić, D. Todorović, M. Dugić, Asymptotic dynamics of the alternate degrees of freedom for a two-mode system: An analytically solvable model, Chinese Physics B 2, 020302 (2013).

У глави девет под насловом „*Јединствени базис бројача у схеми локалног времена*“ представљена је разрада појма локалног времена у, такозваној, схеми локалног времена (СЛВ) представљеној у глави 5 дисертације. Разрада се састоји у уочавању да дефиниција локалног времена није једнозначна за коначни динамички ланац (у стандардној теорији би се рекло: за коначно време) те свако локално време носи извесну неједнозначност – неодређеност за сваки појединачни локални (затворени) систем. На статистичком (Гибсовом) ансамблу таквих система изучена је динамика и утврђено да се ансамбл описује мешаним стањем чак и за затворени квантни систем. У тој слици локално време постаје класични скривени параметар чије мерење забрањује познати „*no cloning*“ теорем квантне информатичке теорије. За системе са малим бројем подсистема СЛВ се практично (не и фундаментално) не може разликовати од стандардне теорије једног, универзалног времена. Међутим, за многочестичне системе ствари стоје сасвим другачије. За одређене дводелне структуре многочестичног система испоставља се да мањи подсистем има

једнозначно дефинисан, тзв., „базис бројача“. У стандардној теорији једног времена се јавља проблем неједнозначности базиса бројача као један аспект проблема мерења те и преласка са квантног на класично. Стандардна теорија то разрешава напуштањем Шредингеровог закона, или увођењем окружења (то јест, трећег подсистема), или интерпретацијски. Отуда нетривијалност решења обог проблема добијеног у оквирима СЛВ. Добијени резултат следи из минималистичког, математички заснованог, неинтерпретацијског разматрања. Рад даје одговор на темељно питање квантних структурних студија, тј., на питање „шта је то квантни (под)систем?“. Када је у питању затворени систем, одговор је: „систем“ је онај скуп степена слободе којем се може придружити локално време. Када је у питању подсистем затвореног система, одговор је: подсистем је сваки скуп степена слободе којем се може придружити једнозначни базис бројача. Научни допринос аутора који је проистекао из ове главе дисертације је објављен у публикацији:

J. Jeknić-Dugić, M. Arsenijević, M. Dugić, **A local-time-induced unique pointer basis**. Proc. R. Soc. A **470**: 20140283 (2014).

У глави десет под насловом „Марковљевост као динамичка последица схеме локалног времена“ изучене су формално-математичке последице динамике коју успоставља схема локалног времена (СЛВ) претходног поглавља. Наиме, посматрана формално као динамичка мапа, динамика утврђена у претходном поглављу захтева засебну анализу. Та анализа води читавом низу нетривијалних уочавања од врло широког интереса (укључујући општу теорију отворених система и космологију), и овде ће бити представљени само основни резултати. Имајући у виду значај и корисност, тзв., Марковљеве динамике у физици отворених система, изучавано је да ли, и када, то јест, под којим условима, динамика коју успоставља СЛВ може бити Марковљева. Динамичка мапа коју успоставља СЛВ је од, колико знамо, до сада непознате врсте. Са једне стране, она је недиференцијабилна. Са друге стране, она је комплетно позитивна, али није декомпозибилна, па отуда није Марковљева. Са треће стране, мапа је линеарна, позитивна, сачувава траг оператора стања па је чак и унитална. Међутим, не-информатичка апроксимација хамилтонијана система води приближној динамичкој мапи која динамички постаје Марковљева – до сада непознат резултат, осим у тривијалном смислу теорије отворених система. За подсистем неке дводелне структуре мапа је Марковљева, али опет само динамички – то јест, мапа није Марковљева за произвољно кратак интервал локалног

времена. Ове, по први пут уочене, особине једне динамичке мапе нужно воде нетривијалним физичким резултатима који се овде не могу исцрпно представити. Научни допринос аутора који је проистекао из ове главе дисертације је објављен у публикацији:

J. Jeknić-Dugić, M. Arsenijević, M. Dugić, **Dynamical emergence of Markovianity in local time scheme**. Proc. R. Soc. A **472**: 20160041 (2016).

У глави једанаест под насловом „Дискусија и отворени задаци“ дат је преглед оригиналних резултата кандидата и неки отворени задаци који се сходно томе појављују.

### **Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

Предмет ове дисертације је динамика различитих дводелних структура сложеног квантног система.

Област „квантних структурних студија“ је нова област у развоју, као подобласт савремене квантне физике од врло широког научног интереса, као и интереса у применама и тумачењима квантне теорије. У средишту ове области су темељна научна питања, као што су питање „шта је 'систем'?", који степени слободе сложеног система се могу непосредно мерити и опсервирати, постоји ли привилегована структура система, да ли су неки дугостојећи проблеми у темељима физике (као проблем квантних основа феноменолошке термодинамике, проблем квантног мерења, прелазак са „квантног“ на „класично“) заправо проблеми који проистичу из опсервирања специфичних структура, те се као такви не морају тичати свих структура сложеног система? У ширем смислу, ова питања сежу и изван ужих квантномеханичких оквира те се тичу и питања физичке природе времена, а отуда и релативистичког појма просторвремена, задатка квантизације гравитације а отуда и основа космологије те тумачења Вилер-ДеВитове једначине. О важности и научној релевантности овог новог дискурса савремене физике говоре и прва уредничка издања (*edited books*) и монографије на тему квантних структура на светском нивоу, у вези са чиме се више информација може наћи на адреси: <http://physics.kg.ac.rs/fizika/pages/quantumStructures/>.

**Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**



Истраживање представљено у дисертацији је потпуно оригинално и на самом је фронту истраживања у вези са квантним структурама, Комисија закључује да рад кандидата Момира Арсенијевића садржи оригиналне научне резултате који нису били предмет ниједног претходно објављеног истраживања.

### **Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области**

Кандидат Момир Арсенијевић се бави истраживањем из области квантне физике од 2009. године, о чему сведоче објављени радови: 1 монографија међународног карактера M12, два поглавља у монографијама међународним карактера M13 и M11, два рада у категорији M21, два рада у категорији M22, два рада у категорији M23, један рад у међународном часопису који није на SCI листи, један рад у националном часопису, као и једно сапштење штампано у изводу на националној конференцији.

### **Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему**

Предати рад „Динамика квантних подсистема и корелација у дводелним канонским структурама“ кандидата Момира Арсенијевића испуњава постављене захтеве теме докторске дисертације, и по обиму, и по квалитету.

### **Научни резултати докторске дисертације**

Комисија истиче да је из докторске дисертације кандидата Момира Арсенијевића проистекло 4 рада у часописима са листе цитираних часописа (SCI) као и једно поглавље у монографији познатог светског издавача:

Радови у часописима са SCI листе (у складу са „Наши у Вос“, КоБсон):

1. M. Dugić, M. Arsenijević, J. Jeknić-Dugić, **Quantum correlations relativity for continuous variable systems**, Science China-Physics, Mechanics and Astronomy **56**(4), 732-736 (2013).

ISSN 1674-7348 (M22)

2. M. Arsenijević, J. Jeknić-Dugić, M. Dugić, **Asymptotic dynamics of the alternate degrees of freedom for a two-mode system: An analytically solvable model**, Chinese Physics B **2**, 020302 (2013).

ISSN 1674-1056 (M22)

3. J. Jeknić-Dugić, M. Arsenijević, M. Dugić, **A local-time-induced unique pointer basis**. Proc. R. Soc. A **470**: 20140283 (2014).  
ISSN 1364-503X (M21)

4. J. Jeknić-Dugić, M. Arsenijević, M. Dugić, **Dynamical emergence of Markovianity in local time scheme**. Proc. R. Soc. A **472**: 20160041 (2016).  
ISSN 1364-503X (M21)

Поглавља у монографијама познатог светског издавача (в. сајт Министарства: <http://www.mpn.gov.rs/nauka/najava-konkursa/>):

1. M. Arsenijević, J. Jeknić-Dugić, D. Todorović, M. Dugić, **Entanglement relativity in the foundations of the open quantum systems theory**, Chapter 2 in *New Research on Quantum Entanglement*, ed. L. Watson, NY: Nova Science Publishers, 2015, pp. 99-116.

ISBN 978-1-63482-919-9 (M13)

### **Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси**

Резултати у овој дисертацији проширују појмовне и методске оквире квантних структурних студија проистеклих из претходних радова истраживачког тима којег предводи ментор ове дисертације, проф. Мирољуб Дугић. Резултати су у математичком облику и проистекли су из, физички појмовно добро дефинисане, математичке формулације задатака. Као такви, резултати су општег, методског карактера те су од интереса, не само за заснивање области квантних структура, већ и за различите примене у свим областима физике у којима се користе мастер једначине, квантне корелације и на њима засновани научни резултати и методи – а то ће рећи у, малте не, свим областима савремене нерелативистичке физике и њеним применама.

### **Начин презентирања резултата научној јавности**

Резултати до којих је кандидат дошао представљени су научној јавности кроз 4 објављена рада у научним часописима за физику, и то два рада категорије M21 и два рада категорије M22, као и у поглављу у тематској монографији светски познатог издавача, категорија M13.

После детаљног прегледа докторске дисертације, као и на основу свега што је утврђено и написано у овом извештају, Комисија доноси следећи

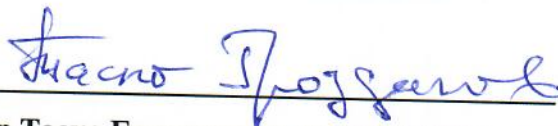
## ЗАКЉУЧАК

Комисија сматра да приложени текст докторске дисертације кандидата Момира Арсенијевића под називом “Динамика квантних подсистема и корелација у дводелним канонским структурама” у потпуности испуњава циљеве постављене у теми коју је прихватило Наставно-научно веће Природно-математичког факултета и веће за природно-математичке науке универзитета у Крагујевцу. Комисија истиче да је поднети текст самостални рад кандидата и да постоје нови и оригинални резултати. На основу анализе научних радова Момира Арсенијевића може се закључити да је испољио запажену научну активност и смисао за анализу и решавање научних проблема из области квантне физике. Систематичан приступ и свестрана анализа указују да је кандидат овладао научним областима од интереса за тему докторске дисертације и да поседује одговарајућу специфичну стручност и оспособљеност. Ова дисертација представља значајан допринос физици и по квалитету, обиму и оствареним резултатима задовољава законске и друге специфичне услове одређене за израду докторске дисертације.

У Крагујевцу

20.10.2016. године

### Чланови комисије:



др Таско Грозданов, научни саветник, председник комисије

Институт за физику, Београд

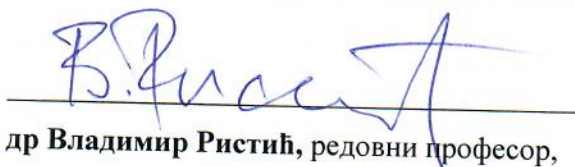
Ужа научна област: Атомска, молекулска и оптичка физика



др Иван Живић, редовни професор,

Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу

Ужа научна област: Физика кондензоване материје



др Владимир Ристић, редовни професор,

Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу

Ужа научна област: Атомска, молекулска и оптичка физика