

Научном већу Института за физику у Београду

Извештај комисије за избор др Игора Станковића у звање научни саветник

На седници Научног већа Института за физику одржаној 24. 9. 2019. године именовани смо у комисију за избор др Игора Станковића у звање научни саветник. Прегледом материјала који нам је достављен, као и на основу личног познавања кандидата и увида у његов рад и публикације, Научном већу Института за физику у Београду подносимо овај извештај.

1. Биографски подаци о кандидату

Игор Станковић је рођен 1976. године у Бијељини, Република Српска, Босна и Херцеговина. Математичку гимназију у Београду је завршио 1994. године. На Електротехничком факултету дипломирао је 1999. године на смеру Физичка електроника – Оптиоелектроника и ласерска техника са просеком 9,10.

Докторске студије на Институту за теоријску физику Техничког универзитета у Берлину (Немачка) започео је у новембру 1999. године. Током докторских студија радио је на проблемима моделовања механичких особина метала и симулација трења у контакту два метала. Докторску дисертацију “Study of interplay between structure and flow in embedded-atom systems” одбранио је у августу 2004. године.

Од октобра 2005. до октобра 2009. радио је у одељењу за напредне технологије компаније Тојота Мотор Европа као инжењер за симулације. У Институт за физику долази 2009. године где је ангажован прво у оквиру пројекта „Моделирање и нумеричке симулације комплексних физичких система“ (ОИ 141035), односно касније на пројектима „Моделирање и нумеричке симулације сложених вишечестичних система“ (ОН171017) и „Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокompозити“ (ИИИ45018) као руководилац потпројекта „Моделирање структурних и транспортних карактеристика наноматеријала“. Област истраживања др Игора Станковића је статистичка физика и нумеричке симулације материјала. Главне теме рада су самоорганизација нанообјеката и механичке и транспортне особине наносистема. У звање виши научни сарадник изабран је 17. децембра 2014. године на основу предлога Научног већа Института за физику у Београду утврђеног 18. марта 2014. године.

У периоду од 2009. до данас ангажован је на пројекту Европске комисије Европска мрежа предузетништва (Enterprise Europe Network) као саветник и члан је у оквиру истог пројекта Секторске групе за нано и микротехнологије. Од 2018. године гостујући је професор на Техничком универзитету Федерико Санта Марија у Валпараизу, Чиле.

Руководио је теоријским делом SCOPES пројекта сарадње са Институтом за физику полимера при Федералном техничком универзитету Цирих (ETH Zürich), Швајцарска, финансираног од Швајцарског фонда за науку у периоду од 2009-2012. Био је и руководилац билатералног пројекта, „Самоорганизација магнетних крутих сфера: утицај геометријског ограничења и магнетног поља” са истраживачима из Француске од 2014-2015. У оквиру програма COST од 2013-2018. био је члан менаџмент комитета две акције MP1303 „Understanding and controlling nano and mesoscale friction” и MP1305 „Flowing matter”.

Аутор је укупно 28 радова, од тога 6 радова у часописима категорије M21a и 16 радова у часописима категорије M21 који су цитирани 225 пута (не укључујући самоцитате) са h-фактором 10.

2. Преглед научне активности др Игора Станковића

Др Игор Станковић бави се у оквиру физике материјала проучавањем утицаја структуре и интеракција унутар материјала на транспортне процесе у наноструктурама и самоорганизацију наночестица са становишта класичне физике. Научно-истраживачка активност кандидата обухвата следеће теме: (1) рачунарска нанотрибологија, (2) самоорганизација диполних честица, и (3) моделовање транспорта у наноструктурама.

Рачунарска нанотрибологија, подобласт трибологије, науке о трењу и абразији, је део физике материјала и бави се фундаменталним процесима у материјалима који се одвијају у контакту два тела у покрету. Примењена истраживања др Игора Станковића усмерена су на развој модела који описују експерименте са апаратуром на бази површинских сила (SFA) и микроскопије на бази атомска сила (AFM), са циљем истраживања молекуларних механизма који контролишу триболошке феномене. Структура и триболошка својства танких слојева (стабилност, сила трења) или свега неколико молекула на контактаној површини могу се мерити у контролисаним условима и резултати мерења се могу директно поредити са симулацијама базираним на методи молекуларне динамике. Да би у симулацијама биле описане просторне и временске скале које су од значаја за системе од индустријског или фундаменталног интереса, др Станковић развија од случаја до случаја одговарајућу симулациону методологију, као што је употреба поступка укрупњавања описа система (замена неколико атома функционалном јединицом са сличним особинама) или моделовање само дела система. Рачунарска нанотрибологија је брзо развијајућа дисциплина у којој се укрштају физика, хемија и инжењерске науке.

Самоорганизација крутих диполних честица (сфера, коцки) је актуелна истраживачка тема у којој се испитују механизми формирања уређених структура састављених од оваквих честица. Диполна интеракција је посебна и по томе што је у случајевима магнетних и електричних дипола описана истим математичким изразом. Према томе, разматрање структура са великом кохезионом енергијом састављених од диполних честица је важно и за разумевање биолошких система у којима молекули имају електрични диполни момент услед присуства локалних наелектрисања. Диполна магнетна интеракција је интересантна и зато што сличне структуре могу бити реализоване са макроскопским и микроскопским честицама: сферама, коцкама, цилиндирма, итд. У свом раду др Станковић користи аналитичке технике, Монте Карло симулације, и минимизационе технике (нпр. метод конјугованог градијента).

Дизајн електронских направа које укључују наночестице укључује често решавање супротстављених захтева, нпр. електроде од нано-жица треба да буду што проводније, али у исто време пропусне за светлост. Приликом производње транзистора формирају се дводимензионалне мреже угљеничних нанотуба са насумично распоређеним нанотубама од којих су приближно 2/3 нанотуба полупроводне, а преостале металне које не мењају своју проводност под утицајем напона на гејту. Зато је важно разумети утицај геометријских и структурних параметара танкослојних транзистора састављених од неуређених мрежа угљеничних нанотуба на њихове транспортне и електричне карактеристике. У оквиру ове теме, развијена је методологија за симулацију карактеристика ових транзистора.

Конкретни истраживачки проблеми којима се кандидат бавио од утврђивања предлога за избор у претходно звање су следећи:

2.1 Механичка својства дводимензионалних материјала

Графен има одлична триболошка својства. Отпор кретању због трења графеном покривених површина може да нестане или да буде веома мали, тј. јавља се такозвана супер-мазивост или супер-подмазивање. Атоми у графену су распоређени у структуру пчелињег саћа и формирају дводимензионални атомски рељеф. Када су две графенске површине у регистру (тј. заториране за умножак од 60 степени), сила трења је велика. Када се две површине ротацијом доведу у стање ван регистра, трење се смањује до супер-мазивости. Од претходног избора у звање др Станковић је објавио следеће радове везане за механичка својства дводимензионалних материјала:

- B. Vasic, I. Stankovic, A. Matkovic, M. Kratzer, C. Ganser, R. Gajic, C. Teichert, *Molecules on Rails: Friction Anisotropy and Preferential Sliding Directions of Organic Nanocrystallites on Two-dimensional Materials* Nanoscale **10**, 18835 (2018).

Развијене су симулације које користе метод молекуларне динамике са циљем да се разумеју резултати експеримента у коме је игличасти кристал органског бР молекула (шест повезаних бензенових прстенова) померан микроскопом на бази атомских сила по графенском супстрату. У експерименту је први пут примењена латерална манипулација сондом микроскопа на бази атомских сила уместо уобичајеног мерења силе трења између сонде и супстрата за проучавање трења на графену. На овај начин експеримент је дао увид у деловање торзионих сила које се јављају при трењу на графену. Торзионе силе су битне јер у примени могу да окрену слојеве графена и, као што је показано, доведу их у стање у регистру са великим трењем. Први резултат важан за разумевање експеримента је био да су на површини супстрата молекули органског кристала паралелни и паралелни са слојем графена (супстратом) тако да је резултујућа сила на цео кристал пропорционална сили на један молекул и броју молекула у контакту са графеном. Симулације су показале да торзиона сила враћа иглицу у стање у регистру, а пошто молекул бР има два везана стања на 11 степени од стања у регистру, у симулацијама су добијена два максимума, која су и потврђена у експерименту.

- B. Vasic, A. Matkovic, R. Gajic, **I. Stankovic**,
Wear Properties of Graphene Edges Probed by Atomic Force Microscopy Based Lateral Manipulation
Carbon **107**, 723 (2016).

Графенски слојеви могу да издрже велика нормална оптерећења због ковалентних веза између атома угљеника. У циљу испитивања понашања ивица графена на деловање бочних сила реализоване су симулације великих система методом молекуларне динамике. Модел се састојао од глатке сферне пробе радијуса 5nm чија је интеракција са графеном и подлогом одбојна. Супстрат од силицијум-диоксида (SiO₂) има димензије 40x200x5nm³, док графенски слој има димензије 35x190 nm², брзина сонде је 5m/s што чини резултате симулација блиским експерименту и у просторним и у временским скалама. Анализом резултата симулације кретања сонде преко ивице графена, идентификована су четири сукцесивна процеса у току манипулације које је било могуће опазити у експерименту само посредно на основу коначног резултата манипулација под различитим условима: мали пораст бочне силе на ивице графена доводи до еластичне деформације, даља манипулација доводи до пластичне деформације и трајног наборавања и делимичног уклањања графена са подлоге, потом долази до пуцања графена и затим потпуног уклањања графена у области скенирања.

2.2 Особине танких слојева јонских течности

Јонске течности као перспективна мазива су једна од главних тема интересовања др Станковића у претходних неколико година у сарадњи са индустријским партнером др Константиносом Гагасом из Тојота Мотор Европа. Од претходног избора у звање др Станковић је из ове теме објавио следеће радове:

- M. Dasic, **I. Stankovic**, K. Gkagkas,
Molecular Dynamics Investigation of the Influence of the Shape of Cation on the Structure and Lubrication Properties of Ionic Liquids,
Phys. Chem. Chem. Phys. **21**, 4375 (2019).
- M. Dasic, **I. Stankovic** K. Gkagkas,
Influence of Confinement on Flow and Lubrication Properties of a Salt Model Ionic Liquid Investigated with Molecular Dynamics
Eur. Phys. J. E **41**, 130 (2018).
- K. Gkagkas, V. Ponnuchamy, M. Dasic, **I. Stankovic**,
Molecular Dynamics Investigation of a Model Ionic Liquid Lubricant for Automotive Applications
Tribology International **113**, 83 (2017).

Катјони и анјони који чине јонске течности обично су асиметрични и неправилног облика и садрже дуге алкилне ланце везане за катјонску главу. Пошто су због дугодометних интеракција симулације и модели јонских течности комплексни, примењен

је еволутиван приступ истраживању у коме је у неколико итерација повећавана комплексност модела. Коначни генерички модел јонских течности укључио је асиметрични катјон који се састоји од позитивно наелектрисане главе и неутралног репа варијабилне величине и велики сферни негативно наелектрисани анјон. Примећено је да, иако једноставан, овај модел доводи до упечатљивих разлика у равнотежној структури: добијена је једноставна кубична решетка за мали катјонски реп, аморфно стање (слично течности) за симетрични катјонски димер, и уређена структура молекуларних слојева за велики реп. Зависност нормалне силе од растојања између плоча повезана је са променама у броју и структури слојева јонске течности. У сагласности са експерименталним резултатима из литературе, двослој репова катјона формиран је за велике процепе између плоча у сва три испитивана модела јонских течности. Заједничко обележје свих истраживаних модела јонских течности је формирање фиксних (стабилних) слојева катјона дуж плоча. Формирање фиксног слоја је резултат јаке Ленард-Донсове интеракције између плоча и јона. Последица стабилности фиксних слојева је нагли пораст нормалне силе при малим размацима између плоча. Нагли пораст нормалне силе је ефекат користан за спречавање контакта између чврстих површина и пратећег хабања. Репови везани за катјоне у фиксном слоју мигрирају са повећањем величине репа. Мали репови чине први слој поред плоча. За симетричне молекуле репови формирају мешовити слој с катјонима, док велики репови обликују мешани слој с анјонима. Истражено је и динамичко понашање танког филма јонске течности при цикличним компресионим покретима горње плоче. Испитивана су два размака између плоча: уски размак, где је анјонски слој подељен на два, и широк размак у којем се формира слој реп до репа. За уски интервал размака уочен је значајан проток јона током цикличног кретања горње плоче. Оштар пад нормалне силе у завршној фази компресије није само последица промене густине због протока, већ је и резултат спајања два анјонска слоја који се одбијају електростатичким Кулоновим силама у један. Анализиран је уложени рад и добијено је да је рад потребан за циклично померање већи за уски процеп, где се број ограничених јонских слојева мења током циклуса. Ипак, ниски хистерезисни губици указују на присуство јаког проклизавања унутар процепа које олакшава проток јона у и ван процепа.

2.3 Антиферромагнетне и ферромагнетне диполне тубе

Од претходног избора у звање др Станковић је из ове теме објавио рад у коме предлаже диполне тубе као модел-систем за магнетне нано-тубе:

- **I. Stankovic**, M. Dasic, J. Otalora, C. Garcia,
A Platform for Nanomagnetism – Assembled Ferromagnetic and Antiferromagnetic Dipolar Tubes,
Nanoscale 11, 2521 (2019).

У овом раду приказано је како магнетно поље проводног цилиндра привлачи магнетне честице и својим цилиндричним просторним ограничењем условљава формирање структура са ферромагнетним и антиферромагнетним уређењем када се искључи струја. Овај систем ограничен цилиндричном геометријом и састављен од дискрених магнетних дипола назван је диполним тубама. Показано је да су диполне тубе употребљиве као модел за разумевање понашања магнетних нанотуба које се састоје од континуалног магнетног

материјала. Анализирано је како цилиндрична геометрија диполних туба разбија непрекидно дегенерисано основно стање у дводимензионалним густо пакованим квадратним и троугаоним решеткама диполних сфера. Као резултат, добијен је низ нових стабилних основних стања у коначним цилиндричним геометријама, тј. сва магнетостатичка стања која су виђена у магнетним нанотубама, у којима је диполна интеракција упоредива или доминантна у односу на изменску интеракцију, репродукована су са диполним тубама. Та стања укључују аксијална и циркуларно магнетизована стања и хеликоидно магнетизована међустања. Као и код магнетних нанотуба примећени су прелази из кружне у аксијалну магнетизацију са повећањем дужине тубе. Поред тога, анализирана је антиферромагнетна фаза која је резултат квадратног распореда диполних сфера на површини тубе и њено занимљиво вртложно стање.

2.4 Основна стања чврстих сфера са диполном интеракцијом

Од претходног избора у звање др Станковић је из ове тематике објавио следеће радове везане за основна стања система диполних честица:

- R. Messina, I. Stankovic,
Assembly of Magnetic Spheres in Strong Homogeneous Magnetic Field,
Physica A 466, 10 (2017).

Испитана је теоријски самоорганизација у две димензије сферних магнета у јаком магнетном пољу. Показано је да су привлачне силе и самоорганизација паралелних магнетних ланаца резултат деликатног међудејства диполне интеракције и искључене запремине, тј. геометрије чврстих сфера. Минималне енергетске структуре добијене су нумеричком оптимизацијом генетским алгоритмом као и аналитичким разматрањима. За мали број конститутивних магнета $N_{\text{tot}} \leq 26$, једноструки линеарни ланац је добијен као основно стање. У режиму броја конститутивних диполних сфера $N_{\text{tot}} \geq 27$, магнети формирају два додирујућа ланца са једнако дугим реповима на оба краја. У две димензије идентификован је прелаз из два у три ланца код $N_{\text{tot}} = 129$. Ова студија објаснила је и механизме одговорне за формирање експериментално добијених трака суперпарамагнетних колоида путем бочне агрегације магнетних ланаца у магнетном пољу.

- R. Messina, I. Stankovic,
Self-assembly of Magnetic Spheres in Two Dimensions: the Relevance of Onion-like Structures
EPL 110, 46003 (2015).

Самоорганизација магнетних сфера је истраживана теоријски у две димензије ван магнетног поља. Конфигурације са минималном енергијом су добијене поступком ригорозне минимизације и потврђене Монте Карло компјутерским симулацијама. Три типичне конфигурације су добијене у зависности од броја магнета N у три димензије. За мали број магнетних сфера, стабилне конфигурације су линеарни низови сфера, затим конфигурација прстена постаје стабилна за $3 < N \leq 17$, у којој вектори магнетизације формирају вортекс (тотална магнетизација је нула). Главно откриће у приказаном раду је начин слагања прстенова, када је број магнетних сфера довољно велики ($N \geq 18$). У том

случају, тј. за велики број честица, магнети у основном стању формирају концентричне прстенове који подсећају на структуру лука.

- **I. Stankovic**, M. Dasic, and R. Messina, *Structure and Cohesive Energy of Dipolar Helices*, *Soft Matter* **12**, 3056 (2016).

Истраживани су једноструко и вишеструко намотани хеликси. Чак и за најједноставнији случај, наиме за једноструко намотани хеликс, добијено је нетривијално понашање када се посматра зависност кохезионе енергије од површинске густине паковања, при аксијалној компресији. Немонотона зависност енергије од густине паковања је резултат деликатног преплитања утицаја диполне интеракције и дискретне геометрије. Најнижа кохезиона енергија постигнута је на највишој густини паковања, при којој се намотаји хеликса додирују. Ниска кохезиона енергија значи да је потребно уложити велики рад да би се једна честица издвојила из хеликса.

У режиму веома високе површинске густине паковања, где је локално уређење троугаона решетка која одговара дискретним тачкама у параметарској равни одређеној пречником хеликса и његовим нагибом према оси, добијене су веома ниске кохезионе енергије. Утврђено је и да магнетизациони параметар уређења указује на оштру промену у диполној оријентацији структуре, која настоји да се постави паралелно са осом хеликса. У потрази за структурама са најнижом кохезионом енергијом на одређеном опсегу дијаметара структура упоређене су кохезионе енергије густо пакованих вишеструко намотаних хеликса (као пример узети су двоструко и четвороструко намотани хеликси), као и АВ и ZZ туба направљених слагањем прстенова, односно нити у случају ZZ туба, које су такође специјални случајеви густо пакованих вишеструко намотаних хеликса. Битан резултат је наглашено ниска кохезиона енергија код ZZ туба. У овим структурама, поравнање нити хеликса са његовом осом је микроструктурни узрочник за тако ниску кохезиону енергију.

2.5 Интеракције због геометријске и магнетне анизотропије магнетних коцки

Магнетна диполна интеракција је дугодометна и анизотропна, а облик коцке доноси додатну геометријску анизотропију и модификује магнетну интеракцију у односу на сферни дипол. Ланци састављени од магнетних коцки представљају одличан парадигматички систем за истраживање процеса самоуређења појединачних честица у макроструктуру и јединствен моделни систем за проучавање понашања сложених агломерата без утицаја окружења (тј. присутне су само конзервативне силе између честица):

- L. Balcells, **I. Stankovic**, Z. Konstantinovic, A. Alagh, V. Fuentes, L. Lopez-Mir, J. Oro, N. Mestres, C. Garcia, *Spontaneous In-flight Assembly of Magnetic Nanoparticles into Macroscopic Chains*, *Nanoscale* **11**, 14194 (2019).

Магнетне коцке добијене су кристализацијом капљица гвожђа у вакууму. Гвоздено језгро магнетне коцкице има правац спонтане магнетизације дуж странице коцке, док омотач од гвожђе оксида има три пута мању магнетизацију од гвожђа, у случају да је

поликристалан понаша се парамагнетно, и има магнетизацију дуж главне дијагонале. Будући да магнетна језгра од гвожђа и омотач од оксида гвожђа имају различите магнетне анизотропије, била је потребна детаљна карактеризација и развој прецизног модела за разумевање магнетне структуре нанокоцки. У раду су коришћени аналитички изрази за магнетно поље униформно намагнетисане коцке за предвиђање енергетски повољних конфигурација. Аналитички резултати су показали да магнетне коцке од 25 nm имају магнетизацију дуж главне дијагонале коцке диктирану омотачем, али да је јачина магнетизације одређена језгром. Пронађен је комплексан енергетски пејзаж дијагонално намагнетисаних коцки који се састоји од кружно готово равне енергетске долине која повезује конфигурацију у којој се странице коцке потпуно додирују и конфигурацију у којој је центар масе једне коцке дуж ивице друге коцке. Дијагонална магнетизација доводи и до неинтуитивне зависности силе између две коцке од растојања између њихових центара. За валидацију развијеног модела извршена је серија мерења микроскопом магнетних и атомских сила и изведене су рачунарске симулације молекуларном динамиком. Показано је да магнетизација дуж дијагонале чини ланац еластичним и омогућава његову стабилност од његовог формирања на путу ка супстрату и у току његовог постављања на супстрат.

2.6 Оптимизација транспорта у случајним мрежама карбонских нанотуба

- M. Zezelj and I. Stankovic:
Random Networks of Carbon Nanotubes Optimized for Transistor Mass-production: Searching for Ultimate Performance
Semicond. Sci. Technol. 31, 105015 (2016).

Нумерички су проучавани ефекти геометријских и структурних параметара танкослојних транзистора са неуређеним мрежама угљеничних нанотуба на њихове транспортне и електричне карактеристике. Испитан је ефекат промене дужине нанотуба на транспортна својства мреже, почев од веома кратких нанотуба код којих је доминантан балистички транспорт електрона, до веома дугачких код којих доминира дифузивни транспорт. Предложен је метод за одређивање оптималног опсега концентрације и дужине нанотуба, ширине и дужине канала у оквиру кога се неуређена мрежа угљеничних нанотуба понаша као транзистор са униформним транспортним и прекидачким карактеристикама. Такође, развијен је аналитички модел за одређивање оптималне концентрације нанотуба у зависности од њихове дужине и димензије канала транзистора са циљем добијања жељених транспортних и електричних својстава транзистора без примене било каквих додатних поступака селекције или уређења нанотуба током и/или након процеса синтезе. Предложени резултати омогућавају ефикасну масовну производњу транзистора са прихватљивим транспортним и прекидачким својствима користећи минималан број производних корака без примене било каквих додатних поступака селекције или уређења нанотуба током и/или након процеса синтезе.

3. Елементи за квалитативну анализу рада

3.1 Квалитет научних резултата

3.1.1 Научни ниво и значај резултата, утицај научних рад

Др Игор Станковић је током научне каријере објавио укупно 28 радова и једну дискусију у међународним часописима са ISI листе, од чега 6 категорије M21a, 16 категорије M21, 4 категорије M22, и по један у категоријама M23 и M24. Укупан импакт фактор радова је 84,6. Од одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања др Станковић је објавио 4 M21a рада, 7 M21 радова и једну дискусију у M21 часопису. Укупан импакт фактор ових радова је 48,3. Квалитет научног рада др Игор Станковића се може проценити, између осталог, из угледа часописа у којима су радови објављени: до сада је објавио је 4 рада у часописима из нанотехнологије *Nanoscale* и *Carbon* (IF=6,97 и 6,34). Најзначајнији радови др Станковића у последњих неколико година су:

1. **I. Stankovic**, M. Dasic, J. Otalora , C. Garcia,
A Platform for Nanomagnetism – Assembled Ferromagnetic and Antiferromagnetic Dipolar Tubes,
Nanoscale 11, 2521 (2019). (M21a, IF=6.97, SNIP=1.338, цитиран 1)
2. L. Balcells, **I. Stankovic**, Z. Konstantinovic, A. Alagh, V. Fuentes, L. Lopez-Mir, J. Oro, N. Mestres, C. Garcia, A. Pomar, B. Martínez,
Spontaneous In-flight Assembly of Magnetic Nanoparticles into Macroscopic Chains,
Nanoscale 11, 14194 (2019). (M21a, IF=6.97, SNIP=1.338, цитиран 1)
3. B. Vasic, **I. Stankovic**, A. Matkovic, M. Kratzer, C. Ganser, R. Gajic, C. Teichert,
Molecules on Rails: Friction Anisotropy and Preferential Sliding Directions of Organic Nanocrystallites on Two-dimensional Materials
Nanoscale 10, 18835 (2018). (M21a, IF=6.97, SNIP=1.338, цитиран 1)
4. R. Messina, L. Abou Khalil, **I. Stankovic**,
Self-assembly of Magnetic Balls: from Chains to Tubes,
Phys. Rev. E 89, 011202(R) (2014). (IF=2.288, SNIP= 1.005, цитиран 28)
5. M. Zezelj, **I. Stankovic**,
From Percolating to Dense Random Stick Networks: Conductivity Model Investigation,
Phys. Rev. B 86, 134202 (2012). (IF=3.664, SNIP=1.091, цитиран 40)

У првом раду раду показано је да у систему магнетних сферичних наночестица просторно ограничење узроковано магнетним пољем проводног цилиндра може довести до формирања феромагнетних и антиферомагнетних диполних туба. Показано је да овај систем може да се употреби као модел за разумевање понашања магнетних нанотуба које се састоје од континуалног магнетног материјала. Поред тога, анализирана је и антиферомагнетна фаза која је резултат квадратног распореда диполних сфера на површини тубе, и која није досад остварена у магнетским нанотубама, а поседује занимљиво локално антиферомагнетско вртложно стање. У овом раду кандидат је први аутор и урадио је највећи део аналитичког рада, симулација и писања рада.

У другом раду приказан је релативно једноставан метод за формирање комплексних уређених структура са магнетним наночестицама као градивним елементима. Допринос кандидата раду се огледао у развоју аналитичког модела и нумеричких симулација које су омогућиле разумевање порекла уређења у овим структурама. Употребљени су аналитички изрази за магнетно поље униформно намагнетисане коцке за предвиђање енергетски повољних конфигурација. Будући да магнетна језгра од гвожђа и омотач од гвожђе-оксида имају различите магнетне анизотропије, за разумевање њихове магнетизације из морфологије структура добијених у експерименту и резултата микроскопије на бази магнетних сила био је потребан прецизан модел. Показано је и да магнетизација дуж дијагонале чини еластичним ланац састављен од магнетних коцки и омогућава његову стабилност од његовог формирања до постављања на супстрат.

У трећем раду је показано да се органски нанокристали на 2Д материјалима могу кретати само у одређеним правцима као да постоје невидљиве шине. Допринос кандидата се огледао у развоју симулација молекуларном динамиком експеримента у коме су игличасти кристали органских 6Р молекула (шест повезаних бензенових прстенова) померани микроскопом на бази атомских сила по графенском супстрату. Резултати симулација омогућили су прецизну идентификацију механизма због ког се иглице померају само дуж стања у регистру где је треће велико. Утврђено је да торзиона сила која се јављала враћа иглицу у стање у регистру.

У четвртном раду истраживана је самоорганизација магнетних сфера теоријски и експериментално у три димензије. Три типичне конфигурације су добијене у зависности од броја магнета N у три димензије. За мали број магнетних сфера, стабилне конфигурације су линеарни низови сфера, затим конфигурација прстена постаје стабилна за $3 < N < 14$, у којој вектори магнетизације формирају вортекс (тотална магнетизација је нула). Главно откриће у приказаном раду је начин слагања прстенова када је број магнетних сфера довољно велики ($N > 13$).

У петом раду проучавана је проводљивост система случајно распоређених штапића (карбонских нанотуба или наножица) са променљивим односом дужине и ширине активног материјала помоћу Монте Карло симулација у широком опсегу густина од прага перколације до десет пута густине прага перколација. Испитан је и утицај коначне величине система на проводност битан за примене у електродама соларних ћелија, штампаној електроници или проводном текстилу. Показано је да просту степену зависност од густине није могуће употребити јер експонент зависе од густине штапића и односа проводности контакта и самог штапића од којих је активни материјал састављен. Предложен је експлицитан модел зависности електричне проводности система од густине и односа проводљивости контакта и штапића. Изведени модел проводљивости је широко применљив на случајне мреже честица (нпр. карбонских нанотуба или наножица).

3.1.2 Позитивна цитираност научних радова кандидата

Према Scopus бази на дан 4. септембра 2019. године, радови кандидата су цитирани 261 пут, док је број цитата без ауоцитата 225 (у 198 цитирајућих радова). Према истој бази, h-индекс кандидата је 10. Сви подаци о цитираности са интернет странице Scopus базе су дати након списка свих радова (пропратни материјал).

3.1.3 Параметри квалитета часописа

Битан елемент за процену квалитета научних резултата је и квалитет часописа у којима су радови објављени, односно њихов импакт фактор – ИФ. У категорији M21a, M21, M22 и M23, кандидат је објавио радове у следећим часописима, где су истакнути они часописи у којима је кандидат објављивао у периоду након одлуке научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања (разврстани према утицајности у години објављивања, подебљани радови су од претходног избора у звање):

Година	назив	М-кат.	IF	SNIP
2019	Nanoscale	M21a	6.97	1.338
2019	Nanoscale	M21a	6.97	1.338
2018	Nanoscale	M21a	6.97	1.338
2016	Carbon	M21a	6.337	1.695
2013	Journal of Physical Chemistry C	M21	4.835	1.083
2016	Soft Matter	M21	3.889	1.034
2014	Combustion and Flame	M21a	3.708	2.303
2012	Physical Review B	M21	3.767	1.091
2019	Physical Chemistry Chemical Physics	M21	3.567	0.981
2017	Tribology International	M21	3.246	2.161
2014	Computer Physics Communications	M21a	3.112	1.733
2011	Journal of Physics D: Applied Physics	M21	2.544	1.044
2009	Topics in Catalysis	M21	2.379	0.638
2012	Physical Review E	M21	2.313	1.005
2004	Physical Review E	M21	2.352	1.005
2004	Physical Review E	M21	2.352	1.005
2016	Semiconductor Science and Technology	M21	2.305	1.002
2015	Physical Review E	M25	2.288	1.005
2014	Physical Review E	M21	2.288	1.005
2017	Physica A	M21	2.132	1.214
2015	EPL	M21	1.963	0.751
2013	Physica A	M22	1.722	1.214
2018	European Physical Journal E	M21	1.686	0.642
2002	Computer Physics Communications	M21	1.2	1.733
2003	Multiscale Modeling and Simulation	M22	1.135	1.193
2013	Physica Scripta	M22	1.296	0.761
2000	Superlattices and Microstructures	M22	0.859	0.884
2009	Acta Physica Polonica A	M23	0.433	0.453

Укупан фактор утицаја радова кандидата је 84,6 а у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања, тај фактор је 48,3. Часописи у којима је кандидат објављивао су по свом угледу веома цењени у областима којима припадају. Међу њима, посебно се истичу: Carbon, Nanoscale, Journal of Physical Chemistry C, Soft Matter, Combustion and Flame, Physical Review B, Physical Chemistry Chemical Physics, и Tribology International.

Додатни библиометријски показатељи квалитета часописа у којима је кандидат објављивао радове након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања је дат у следећој табели. Она садржи импакт факторе (IF) радова, М поене радова по српској категоризацији научноистраживачких резултата, као и импакт фактор нормализован по импакту цитирајућег чланка (SNIP). У табели су дате укупне вредности, као и вредности свих фактора усредњених по броју чланака и по броју аутора по чланку.

	М	IF	SNIP
Укупно	94.5	48.3	14.5
Усредњено по чланку	7.9	4.0	1.2
Нормирано на број аутора	28.3	12.8	4.3

3.1.4 Степен самосталности и степен учешћа у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству

Кандидат је први аутор у 6 радова, други аутор 14 радова и последњи аутор 8 радова (укупан број радова кандидата током каријере је 28). На радовима који су објављени у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног звања, кандидат је први аутор 2 рада, други аутор 7 радова и последњи аутор 3 рада (укупни број радова кандидата који су објављени у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног звања је 12). У свим радовима након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног звања, кандидат је аутор за кореспонденцију.

У случају чланака [2,11,19-21,27] у којима је кандидат водећи аутор, кандидат је формулисао проблем и написао рад, у радовима [6-8,15,16,22,23] формулисао је тему и написао рад у сарадњи са студентима докторских студија др Миланом Жежељем, др Јеленом Смиљанић и др Миљаном Дашићем. У радовима [10,12,13,29] формулисао је тему у сарадњи са др Ренеом Месином у оквиру сарадње на билатералном српско-француском пројекту, а унутар матичне лабораторије на радовима [14,24,28] формулисао је тему у сарадњи са др Ненадом Вукмировићем и имплементирао симулације са студентом докторских студија др Марком Младеновићем. У радовима [1-4,10,19-21,27,29] самостално је добио све теоријске резултате. Др Станковић је написао радове [1,2,5,18-21,22,27]. У експериментално-теоријским радовима [1,3,4], др Станковић се једини бавио моделовањем и симулацијама и теоријски део тих радова је у потпуности његов допринос.

Др Игор Станковић је покренуо истраживање низа тема у Институту за физику: моделовање транспорта у случајним мрежама нано-објеката, рачунарска нанотрибологија дводимензионалих материјала и јонских течности, и потрагу за основним стањима у диполним системима.

Кандидат је сарађивао са истраживачким групама у Француској др Рене Месина – Универзитет у Лорени [10-13,29], Чилеу др Карлос Гарсија – Технички универзитет Федерико Санта Марија у Валпараизу [1,2], Белгијом др Константинос Гагас - Одељење за напредне технологије компаније Тојота Мотор Европа [5,7-9,18], Аустрији др Кристијан Тајхерт и др Маркус Крацер - Монтан универзитет у Леобену [3,4], Шпанији др Луис Балцејс - Институт за науку о материјалима у Барселони [1].

3.1.5 Награде

Кандидат је у току 2018. године боравио као гостујући професор на Техничком универзитету Федерико Санта Марија у Валпараизу финансиран од Владе Чилеа.

3.2 Ангажованост у формирању научних кадрова

Под менторством др Игора Станковића су до сада урађене и одбрањене две докторске дисертације.

- Др Милан Жежељ је докторску тезу, под насловом „Modeling and optimization of transport processes in modern nanoelectronic devices” одбранио 2017. године на Електротехничком факултету у Београду (видети прилог).
- Др Миљан Дашић је докторску тезу, под називом „Modeling the Behaviour of Confined Dipolar and Ionic Systems” одбранио 2019. године на Физичком факултету у Београду (видети прилог), након чега се упутио на постдокторско усавршавање у Републици Чешкој.

Под менторством др Игора Станковића су до сада урађена и одбрањена два мастер рада на Електротехничком факултету.

- Др Марко Младеновић је мастер тезу (ко-ментор др Ненад Вукмировић), под називом „Атомска и електронска структура граница између кристалних домена у нафталену” одбранио 2012. године (видети прилог).
- Др Миљан Дашић је мастер тезу (ко-ментор др Дејан Гвоздић), под називом „Прорачун структуре и енергије самоорганизованих магнетних честица у геометријски ограниченој средини” одбранио 2013. године (видети прилог).

Као гостујући професор 2018. на Техничком универзитету Федерико Санта Марија у Валпараизу одржао је курс за студенте докторских студија „Нумеричке методе у примењеној физици“.

3.3 Нормирање броја коауторских радова, патената и техничких решења

Теоријски радови др Станковића објављени у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања су базирани на аналитичким прорачунима и комплексним нумеричким симулацијама и имају пет или мање аутора, тако да улазе са пуном тежином у односу на број коаутора.

Два експериментално-теоријска рада подразумевала су шире сарадње. Један од ових радова има седам аутора и такође улази са пуном тежином у односу на број коаутора, а други рад има 11 аутора и у том случају је број М бодова нормиран по Правилнику.

3.4 Руковођење пројектима, потпројектима и пројектним задацима

Др Игор Станковић руководи потпројектом „Моделирање структурних и транспортних карактеристика наноматеријала“ у оквиру пројекта основних истраживања ИИИ45018 „Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокомпозити“ Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Др Станковић руководи темом „Симулације система наночестица, молекула и 2д материјала са дугодометним интеракцијама“ у оквиру Центра изузетних вредности за изучавање комплексних система Института за физику у Београду.

Др Станковић руководио је пројектом „Самоорганизација магнетних крутих сфера - утицај магнетног поља и геометријског ограничења“ у оквиру билатералне сарадње са Француском, Универзитет у Лорени, за период 2014-2015. године. Пројекат су финансирани Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и Кампус Француска кроз програм Павле Савић.

Др Станковић, заједно са др Зораном Дохчевић-Митровић, руководио је пројектом „*Nano-crystalline porous anatase TiO₂ for environmental applications: Synthesis process and transport characteristics study Materials*“ у оквиру SCOPES 2009-2012 пројекта Швајцарске националне фондације за науку (SNF).

Руковођења овим пројектима, односно потпројектом, су документована у прилозима.

3.5 Активност у научним и научно-стручним друштвима

Др Игор Станковић био је члан менаџмент комитета (2013-2017) COST акције MP1303: „Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction“.

Др Станковић био је члан менаџмент комитета (2014-2018) COST акције MP1305 „Flowing matter“.

Др Станковић је саветник на пројекту Европске комисије Европска мрежа предузетништва од 2009. године и члан Секторске групе за Микро и нанотехнологије.

Рецензент је у часописима Tribology International, Journal of Physical Chemistry C, Nanotechnology, Journal of Physics Communications, Scientific Reports. Chemical Physics Letters, IEEE Sensors Journal и ACS Nano.

Др Станковић је био члан Организационог комитета The First European Workshop on Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction, May 26 – 29, 2014, Can Picafort, Majorca (Spain).

Све наведене активности су документоване у прилозима.

3.6 Утицајност научних резултата

Утицај научних резултата кандидата се огледа у броју цитата који су наведени у поглављу 3.1 извештаја, као и у прилогу о цитираности. Значај резултата кандидата је

такође описан у поглављу 3.1. а подаци о цитираности са интернет странице Scopus базе су дати у прилогу.

3.7 Конкретан допринос кандидата у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству

Др Игор Станковић је значајно допринео сваком раду у коме је учествовао. Покренуо је два правца рада која раније нису била заступљена на Институту за физику у Београду и значајно их унапредио у Србији. Први правац рада је рачунарска нанотрибологија. Овај правац рада је резултовао са пет објављених радова након претходног избора у звање – два рада су експериментално-теоријска и зато веома значајна јер су омогућила потпуно сагледавање физичких процеса са сигурношћу да симулације добро одсликавају експеримент. У овим радовима др Станковић се једини бавио симулацијама и теоријски део тих радова је у потпуности његов допринос. Друга три рада урађена су у сарадњи са компанијом Тојота Мотор Европа. У два рада први аутор је докторанд др Станковића, а највећи део рада је урађен на Институту за физику у Београду. Др Станковић је био непосредно укључен у сваки сегмент израде ових радова: дефинисање теме рада, писање рада, аналитичке и нумеричке прорачуне, и дискусију са колегама у Београду и у иностранству о дизајну и резултатима симулација и мерењима којима би могла да се обаве да би се добили услови што приближнији у експерименту и у теорији.

Други правац научно-истраживачког рада др Станковића везан је за потрагу за основним стањима класичног система чврстих тела са диполном интеракцијом. Ова врста истраживања везана за нанообјекте, у којима се предвиђа њихова самоорганизација, није била раније заступљена на Институту за физику у Београду. Овај правац рада започет је са проф. др Рене Месином у Француској, а касније примењен у сарадњи са колегама из Шпаније и Чилеа експериментално-теоријским истраживањима која су објављена у радовима са веома високим фактором утицаја ($IF > 6$). О овој теми објављена су четири рада и једна научна дискусија у врхунском научном часопису након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања. Поред нумеричких прорачуна др Станковић дао је дао значајан допринос и у анализи резултата и писању ових радова.

Др Игор Станковић је са својим бившим студентом др Миланом Жежељом покренуо и тему оптимизације геометрије мрежа нано-објеката са применом на транспарентне електроде од сребрних наножица и танкослојне транзисторе од карбонских нанотуба. У оквиру ове теме др Станковић је руководио истраживањем, предложио је експлицитне аналитичке моделе за разумевање резултата добијених Монте Карло симулација и дао је значајан допринос у писању радова.

3.8 Уводна предавања на конференцијама и друга предавања

У периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног звања, кандидат је одржао следећа самостална предавања по позиву:

I. Stankovic,

Theoretical and experimental study of objects composed of dipoles,
9th International Conference of Balkan Physical Union 2015,
August 24-27 2015, Istanbul, Turkey, invited talk

I. Stankovic,

Modeling nanomanipulation with AFM probe: insights into superlubricity and friction anisotropy
X Escuela de Nanoestructuras,
January 14-18 2019, Valparaiso, Chile, invited talk

I. Stankovic,

Métodos de simulación molecular / Aplicaciones de la dinámica molecular
Summer School of Physics for Students, University Bio Bio,
January 9-13 2017, Concepcion, Chile, invited lecture

Након претходног избора у звање, кандидат је одржао следећа предавања током
посета истраживачким институцијама

I. Stankovic,

Superlubricity & frictional anisotropy: why molecules chose rough ride?
Technical University Federico Santa Maria, October 26th 2018, Valparaiso, Chile, invited seminar

I. Stankovic,

Structure of Ground State in Dipolar Systems
Universidad Andres Bello, August 22nd 2018, Santiago, Chile, invited seminar

I. Stankovic,

Structure of Ground State in Dipolar Systems
Instituto de Fisica de la Pontificia Universidad Catolica de Valparaiso,
May 9th 2018, Valparaiso, Chile, invited seminar

I. Stankovic,

Simulations of wear properties of graphene edges
Institut de Ciència de Materials de Barcelona, July 5th 2017 Barcelona, Spain, ICMAB invited
seminar

I. Stankovic,

Structure and cohesive energy of dipolar helices
University of Lorraine, June 16th 2016 Metz, France, group seminar

4. Елементи за квантитативну оцену научног доприноса кандидата

Др Игор Станковић је током научне каријере објавио укупно 28 радова и једну дискусију у међународним часописима са ISI листе, од чега 6 категорије M21a, 15 категорије M21, 5 категорије M22, и по један у категоријама M23 и M24. Укупан импакт фактор радова је 84,6. Од одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања др Станковић је објавио 4 M21a рада, 6 M21 радова, 1 M22 рад и једну дискусију у M21 часопису. Укупан импакт фактор ових радова је 48,3.

Према Scopus бази на дан 4. септембра 2019. године, радови кандидата су цитирани 261 пут, док је број цитата без аутоцитата 225. Према истој бази, h-индекс кандидата је 10. Сви подаци о цитираниости са интернет странице Scopus базе су дати су у прилогу.

Остварени резултати у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања:

M-категирија	бодови	број радова	укупно	нормирано
M21a	10	4	40	35,56
M21	8	6	48	48
M22	5	1	5	5
M25	1,5	1	1,5	1,5
M32	1,5	1	1,5	1,5
M34	6	0,5	3	3

Поређење са минималним квантитативним условима за избор у звање научни саветник:

	Неопходно	Остварено	Нормирано
Укупно	70	99	94,56
M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90 \geq	50	96	91,56
M11+M12+M21+M22+M23 \geq	35	93	88,56

ЗАКЉУЧАК

Имајући у виду изузетно високу вредност и оригиналност научних радова др Игора Станковића, као и његово значајно искуство у међународној сарадњи и трансферу знања, мишљења смо да је кандидат достигао високу истраживачку зрелост и научну компетентност. На основу података из извештаја види се да он задовољава све квалитативне и квантитативне услове за избор у звање научни саветник који су прописани Правилником о поступку, начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Због тога нам је изузетно задовољство да предложимо Научном већу Института за физику у Београду да донесе одлуку о прихватању предлога за избор др Игора Станковића у звање научни саветник.

У Београду, 25. 9. 2019.

Чланови комисије:

др Слободан Врховац,
научни саветник,
Институт за физику у Београду

др Ненад Вукмировић,
научни саветник,
Институт за физику у Београду

проф. др Ђорђе Спасојевић,
редовни професор,
Универзитет у Београду - Физички факултет