

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА

УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо одлуком Наставно-научног већа Физичког факултета, на седници одржаној 14.9.2022. године у Београду, одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Стефана Граовца, мастер физичара и студента докторских студија Физичког факултета, под називом „Појава, пропација и контрола критичних догађаја у неуређеним системима са метастабилном динамиком“ из уже научне области Физика кондензоване материје и статистичка физика, коју је он предао Физичком факултету дана 6.9.2022. године, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

Стефан Граовац рођен је 14.4.1994. у Суботици, Република Србија. Основну школу и Гимназију завршава као добитник Вукове дипломе и 2013. године уписује основне студије на Физичком факултету, Универзитет у Београду. Кандидат је завршио основне студије на Физичком факултету, Универзитет у Београду, 2017. године са просеком 9,45/10. Исте године уписује мастер студије на Физичком факултету и 12.3.2018. године брани мастер рад под насловом „Ефекти динамике популације код биофизичког моделовања регулације експресије гена код рестрикционо-модификационих система бактерија“. Мастер студије завршава са укупном оценом 10. Касније те године уписује интердисциплинарне докторске студије при Универзитету у Београду – модул Биофизика и бива изабран у звање истраживач приправник. Наредне године, уписује докторске студије на Физичком факултету на студијском програму Физика кондензоване материје и статистичка физика.

Током основних студија, Стефан је радио праксу на Институту за физику у Београду и био на пракси на Институту за примењену физику у Јени, Немачка. На

докторским студијама кандидат је помагао при извођењу наставе на предметима Лабораторија физике 1 и 2.

Ван факултетских обавеза, кандидат је био ментор у Истраживачкој станици Петница и био у раду комисије за прегледање на Републичком такмичењу из физике и на Српској физичкој олимпијади за средње школе.

1.2 Научна активност

Кандидат се у свом научном раду бави нумеричким истраживањима у неравнотежној статистичкој физици, са акцентом на неравнотежној динамици феромагнетика. Запослен је као истраживач сарадник на Физичком факултету, Универзитет у Београду. Сва три рада која су део дисертације су објављена у међународним часописима М21 категорије. Добијене резултате је презентовао на конференцији „Avalanche 2022“ 29. августа 2022. године.

2. Опис предатог рада

2.1 Основни подаци

Докторска дисертација кандидата је урађена под менторством др Светислава Мијатовића, доцента Физичког факултета Универзитета у Београду. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођење изработом докторске дисертације, јер је у научном звању и аутор је великог броја радова из области неравнотежних модела феромагнетика који су објављени у врхунским међународним часописима и представљени на међународним и домаћим конференцијама. Дисертација је написана на 91 страни не рачунајући насловну страну, захвалнице, сажетак, садржај, биографију аутора и неопходне изјаве, све у складу са упутством за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Дисертација је подељена у 7 глава уз један прилог и наведено је 157 референци.

2.1 Предмет и циљ рада

Изучавање појава чија се еволуција одвија кроз лавинске процесе добија све више на значају у XXI веку, па се за изучавање ове комплексне динамике развијају модели у оквиру статистичке физике и физике кондензоване материје који описују неравнотежне системе са метастабилном динамиком. Разлог томе је примена на велики број различитих реалних појава, чија еволуција има лавински карактер. Појаве попут

ширења вируса, земљотреса и краха акција на финансијском тржишту могу да имају разорне последице па је потреба да се разумеју и макар делимично контролишу критични догађаји са лавинском релаксацијом порасла са њиховом учестаношћу. Као репрезентативан пример модела оваквих појава, у овој дисертацији је изабран Изингов модел са случајним пољем који се користи за проучавање фазних прелаза у феромагнетним материјалима, пре свега због своје једноставности као и доброг описивања неких од појава везаних за реалне феромагнетне системе.

Циљ истраживања је идентификовање критичног понашања у систему и разумевање механизма настајања критичног догађаја. Стога, први део дисертације је базиран на развијању новог метода за идентификовање постојања критичног понашања у неуређеним системима са метастабилном динамиком. Када је критично понашање идентификовано, потребно је да се проучи механизам еволуције лавина као и услови који су неопходни да би настала лавина која прожима цео систем, чему је посвећен други део дисертације. У трећем делу дисертације приказани су резултати истраживања комплексних хетероструктура које се састоје од феромагнетних и антиферомагнетних слојева а које налазе велику примену у технологији - конкретније у спинтроници. Контрола услова за настанак критичних догађаја може да доведе и до технолошког напретка, али и да ублажи негативне последице катастрофалних појава.

2.3 Публикације

У овој докторској дисертацији су представљени резултати три рада објављена у међународним часописима категорије M21:

[1] Mijatović, S., Jovković, D., Janićević, S., Graovac, S., & Spasojević, D. (2021). A tool for identifying the criticality in the disordered systems with metastable dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 572, 125883.

[2] Graovac, S., Mijatović, S., & Spasojević, D. (2021). Mechanism of subcritical avalanche propagation in three-dimensional disordered systems. *Physical Review E*, 103(6), 062123.

[3] Mijatović, S., Graovac, S., Spasojević, D., & Tadić, B. (2022). Tuneable hysteresis loop and multifractal oscillations of magnetisation in weakly disordered antiferromagnetic-ferromagnetic bilayers. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 115319.

2.4 Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Дисертација је подељена у 7 глава, од којих су прве три увод и прегледи досадашњих резултата у области, а престале 4 главе су оригинални резултати кандидата.

Главни резултати ове дисертације су:

(i) *Развијен је нумерички метод за утврђивање постојања критичног понашања модела и одређивање вредности критичне неуређености система.* Постоји више начина за одређивање критичних параметара код Изинговог модела са случајним пољем, међутим, ниједан није егзактан. Због тога постоји потреба да се резултати потврде и провере са више различитих метода. То је био мотив да се предложи нов метод за идентификовање критичног понашања код неравнотежних система са метастабилном динамиком. Идеја новопредложеног метода за идентификовање критичног понашања јесте праћење зависности критичног поља H_c од неуређености R за различите почетне конфигурације спинова у решетки. Стандардно су на почетку симулације сви спинови у систему окренути на доле, $S_i = -1$. Пре почетка симулације, одређени спинови се поставе на вредност $S_i = 1$ и тако чине почетни интерфејс који је или постављен у попречни пресек система (линија за 2Д системе, а раван за 3Д системе) или формира компактнију скупину спинова – острво. У термодинамичком лимиту интерфејс постављен у попречном пресеку би био бесконачан интерфејс. Добијени резултати показују да у парамагнетној фази вредност спољног поља за које суцептибилност достиже максимум остаје непромењена без обзира на различите почетно постављене интерфејсе. Насупрот томе, у феромагнетној фази, постојање бесконачног (за коначне системе прожимајућег дуж попречног пресека система) интерфејса смањује вредност критичног поља у односу на системе са коначним (непрожимајућим) почетним интерфејсом. Пажљивим избором почетних интерфејса у коначним системима, симулирано је понашање система у термодинамичком лимиту и одређене су вредности за критичну неуређеност:

- a) тродимензиони систем са кубном решетком: $R_c^{3D} = 2.154 \pm 0.007$
- b) дводимензиони систем са квадратном решетком: $R_c^{2D-sq} = 0.544 \pm 0.008$
- c) дводимензиони систем са саће (хексагоналном) решетком: $R_c^{2D-hex} = 0$.

(ii) *Анализиран је механизам пропагације лавине.* Током еволуције система, пре појаве прожимајуће лавине, ствара се матрица преокренутих острва спинова која делује као одређена структура подршке за настајање прожимајуће лавине. Главно питање које се намеће јесте да ли се појављује прожимајућа лавина уколико се наруши формирање матрице острва? Да би се то испитало, прво су вршене стандардне симулације у циљу утврђивања тренутка и стања система када се појави прожимајућа лавина. Затим су прављене модификације система и нове симулације да би се испитали услови при којима се јавља прожимајућа лавина. Прво су сва острва, која се формирају пре појаве прожимајуће лавине (ти спинови имају вредност $S_i = 1$), а нису у контакту са почетним спином прожимајуће лавине, преокренута назад да им спинови имају вредност $S_i = -1$ и наметнут је услов да острва могу да се преокрену само ако лавина дође до њих и ако је задовољен услов $h_i^{eff} \geq 0$ (модел пропагације фронта). Спољно поље је једнако спољном пољу при ком се јави прожимајућа лавина у стандардној симулацији. Затим, спиновима у острву је промењено случајно поље h_i тако да се спинови преокрену уколико им је преокренут један било који сусед, два суседа или три суседа. Број прожимајућих лавина по једној симулацији за поменуте модификације и величине система 100^3 , 60^3 и 20^3 опада са порастом неуређености и линеарне димензије система. Симулације показују да је тај број знатно мањи од 1, чак и за најрелаксиранији услов преокретања спинова у острву, када је потребно да само један суседни спин буде преокренут и да се цело острвце преокрене. Из свега наведеног, закључено је да, у средњем, не долази до појаве прожимајуће лавине у термодинамичком лимиту када је формација острва нарушена.

Велики део истраживања посвећен је утицају интерфејса на пропагацију лавине. Природно је за очекивати да почетни интерфејс помаже лавини у прожимању система. Стога, уведене су и модификације у симулације у циљу испитивања утицаја интерфејса на појаву прожимајуће лавине. Оригинални интерфејси су увећавани за 10, 100 и 1000 спинова уколико је интерфејс већ природно био формиран, а формиран су у системима у којима их није било. Добијени резултати показују да додавање интерфејса, очекивано, повећава број прожимајућих лавина по симулацији, али тај број и даље брзо опада са порастом неуређености и порастом линеарне димензије система па закључак остаје непромењен.

Велику улогу у простирању лавине игра растојање између острва. Резултати показују да острва између себе формирају теснаце који, када су острва формирана, служе као „аутопут“ за лакши пролаз лавине због двоструког смањења ефективног поља које делује на спинове тих теснаца. Међутим, када је формација острваца

нарушена, ови теснаци су својеврсне „замке“ и не дозвољавају лавини да стигне до самог острвца због великог ефективног поља локалних спинова.

Уколико се наруши формирање ове матрице, у систему неће доћи до појаве прожимајуће лавине. Шта више, формирање матрице острва преокренутих спинова је од већег значаја за настанак прожимајуће лавине него величина интерфејса.

(iii) *Испитивана је хетероструктура сачињена од феромагнетног и антиферомагнетног слоја различитих дебљина.* На хистерезисној петљи су уочени платои који одговарају експерименталним мерењима узорака са антиферомагнетним интеракцијама. Прелази између тих платоа одговарају преокретању групације спинова у хетероструктури и могу да се уоче као пикови на сигналу магнетизације. Спољно магнетно поље је повећавано континуално прво уз узлазну грану хистерезисне петље а затим је вредност спољног магнетног поља смањивана низ силазну грану хистерезисне петље, чиме би се навршио један циклус. Позитиван део сигнала има 6 мањих пикова који одговарају преокретањима спинова у антиферомагнетном слоју, док велики пик на сигналу одговара преокретању спинова у феромагнетном слоју. Први пик се јавља при вредности спољног магнетног поља $H \approx -6$. Ефективно поље које делује на спинове у антиферомагнетном слоју пре него што се спинови преокрену је $h_i^{S,\text{eff}} = H + (-4)(-1) + (-1)J + h_i = H + 6 + h_i$; где је $h_i \approx 0$ услед мале неуређености у систему. Дакле, спинови $S_i = -1$ у антиферомагнетном слоју су стабилни све док спољно магнетно поље не достигне приближну вредност $H \approx -6$. Тада, неки од спинова (у зависности од вредности случајног поља) постају нестабилни и могу да се преокрену. У идеалном случају без неуређености и нечистоћа, сваки други спин у антиферомагнетном слоју би се преокренуо при $H = -6$ услед антиферомагнетне интеракције која фаворизује антипаралелно уређење спинова. Тада би сваки спин у антиферомагнетном слоју имао 4 супротно преокренута суседна спина (слој би могао да се подели на две подрешетке) и овакво стање је стабилно све док спољно магнетно поље не достигне вредност $H = -4(-1)(-1)J = 2$ када се спинови из феромагнетног слоја преокрећу. Међутим, услед слабе неуређености, локална поља у неким чворовима су таква да спречавају преокретање спина при $H \approx -6$, па неки од спинова имају једног, два или три непреокренута суседа. Ови непреокренути спинови се онда преокрећу при вредностима спољног поља $H \approx -4; -2; 0$, редом. Када спољно магнетно поље достигне вредност $H = 2$, спинови у феромагнетном слоју који су у контакту са непреокренутим спиновима из антиферомагнетног слоја постају нестабилни. Тада хистерезисна петља има већи скок

при вредности $H = 2$ и промена магнетизације услед тог скока је $\approx 0,5 - (-0,5) = 1$, што значи да се пола спинова у систему преокренуло у том тренутку, што одговара целом феромагнетном слоју у двослојном систему. Даље, када се цео феромагнетни слој преокренуо, променило се и ефективно поље које делује на спинове у антиферомагнетном слоју на граници два слоја. Неки од спинова на граници два слоја постају нестабилни и могу да се преокрену на вредност $S_i = 1$. Спинови који су остали стабилни и непреокренути се преокрећу при вредностима спољног магнетног поља $H \approx 4$ и $H \approx 6$, у зависности од суседних спинова.

Број платоа зависи од дебљине антиферомагнетног слоја. Флуктуације магнетизације се јављају на прелазу између два платоа као низ таласања магнетизације и на њихов облик (висину и ширину пика) утичу неуређеност и стална промена спољног магнетног поља. Сваки талас магнетизације одговара групи спинова у моделу која при датој вредности спољног магнетног поља постаје нестабилна и преокреће се. Различите групе нестабилних спинова се јављају услед узајамног дејства слабих локалних случајних поља, припадности одређеној подрешетки у антиферомагнетном слоју и јачине изменске интеракције између слојева. Са друге стране, на вредности коерцитивног поља утичу јачина изменске интеракције између слојева и морфологија и дебљина феромагнетног слоја. Такође, на вредност коерцитивног поља утичу и неуређеност у систему и димензије решетке система. У лимиту $R \rightarrow 0$, ширина пикова флуктуације магнетизације такође тежи нули, тј. група спинова која се преокреће у датом пику се преокреће при истој вредности спољног магнетног поља. Међутим, са постојањем неуређености у систему, неки од спинова се преокрећу при нешто мањој или нешто већој вредности спољног магнетног поља па пикови флуктуације магнетизације имају ширину. У одређеном опсегу неуређености сигнал пада на нулу.

3. Списак публикација

[1] Mijatović, S., Jovković, D., Janićević, S., Graovac, S., & Spasojević, D. (2021). A tool for identifying the criticality in the disordered systems with metastable dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 572, 125883.

[2] Graovac, S., Mijatović, S., & Spasojević, D. (2021). Mechanism of subcritical avalanche propagation in three-dimensional disordered systems. *Physical Review E*, 103(6), 062123.

[3] Mijatović, S., Graovac, S., Spasojević, D., & Tadić, B. (2022). Tuneable hysteresis loop and multifractal oscillations of magnetisation in weakly disordered antiferromagnetic-ferromagnetic bilayers. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 115319.

4. Провера оригиналности докторске дисертације

Провером оригиналности докторске дисертације Стефана Граовца, спроведене 10.9.2022. године од стране Универзитетске библиотеке Светозар Марковић, Београд, на основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација, које се бране на Универзитету у Београду, помоћу програма “iThenticate”, утврђено је да дисертација садржи 3% текста који се јавља у другим текстовима доступним библиотеци (базе свих часописа са SCI листе, базе докторских дисертација и мастер теза у свету и код нас). Поклапања су нађена са укљученим опцијама: “Quotes Excluded” (изоставља из провере цитирани текст) и “Bibliography Excluded” (изоставља из провере референце). Највећи део поклапања се односи на математичке формуле које се јављају у публикованим радовима докторанда, док је остатак грешка програма (нпр. појединачне речи или мале групе речи као што су “докторска дисертација”, “Београд”, “др”, “редовни професор”, “факултет” и слично).

Стога сматрамо да је утврђено да је докторска дисертација Стефана Граовца у потпуности оригинална, као и да су у потпуности испоштована академска правила цитирања и навођења, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

ЗАКЉУЧАК

На основу изложеног, Комисија закључује да резултати кандидата Стефана Граовца, приказани у оквиру ове докторске дисертације представљају значајан и оригиналан научни допринос у области физике кондензоване материје и статистичке физике. Из области дисертације кандидат има 3 објављена рада у врхунским међународним часописима. Сходно томе, Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију кандидата Стефана Граовца под насловом:

„Појава, пропација и контрола критичних догађаја у неуређеним системима са метастабилном динамиком“

и предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да прихвати и одобри њену јавну одбрану.

У Београду, 14.9.2022. године.

проф. др Сунчица Елезовић-Хацић

Редовни професор, Физички факултет, Универзитет у Београду

проф. др Ђорђе Спасојевић

Редовни професор, Физички факултет, Универзитет у Београду

доц. др Сања Јанићевић

Доцент, Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу
