

# НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо 25.5.2016. године на осмој седници Наставно-научног већа одређени за комисију за преглед и оцену докторског рада *Quasi-classical ground states and magnons in monoprotic spin systems* (Квази-класична основна стања и магнони у монопериодичним спинским системима) Наташе Лазић, студента докторских студија Физичког факултета, подносимо

## РЕФЕРАТ

### 1. Биографија

Наташа Лазић је рођена 1980. године у Београду, где је завршила основну школу и гимназију, а затим уписала Физички факултет Универзитета у Београду, смер теоријска и експериментална физика. Након дипломирања 2010, уписала је докторске студије физике на истом факултету. Положила је све испите и 2012. године одбранила тему пред Колегијумом докторских студија. Од 2010. године је запослена на Физичком факултету као истраживач приправник, а 2013. године је изабрана у звање истраживач сарадник. До сада је објавила шест научних чланака у међународним часописима. Ангажована је на пројекту "Нискодимензионалне наноструктуре" Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Научна активност Наташе Лазић заснива се на анализи симетрије у физици кондензоване материје, првенствено код квази-једнодимензионалних система. То обухвата резултате о стабилним положајима угљеничних нанотуба и методологију квази-класичне теорије магнетизма.

### 2. Опис докторског рада

#### 2.1. Тема и циљеви

Тема истраживања обухваћених овим радом је систематско увођење метода симетрије у проучавање магнетизма, пре свега квази-једнодимензионалних уређених система. У том смислу су у првом плану развој формализма али и његово прецизирање, да би се омогућило коришћење познатих техника, или уочиле и превазишле њихове недостатности. Конкретни примери, са у литератури постојећим експерименталним резултатима, третирају се пре свега као провера нових теоријских концепата и алгоритама.

## 2.2. Садржај и резултати

Магнетизам је као атрактиван феномен проучаван од античких времена до данас, када је познато да се налази у позадини низа интересантних новооткривених својстава кондензоване материје. И поред тога, измиче комплетном и тачном опису, те се поједини аспекти проучавају у оквиру различитих, по физичком садржају и нивоу, апроксимација, које најчешће доводе до ефективне динамике са доминантним делом квадратним по спиновима. Основни разлог оваквог статуса је многочестичност интеракције, па су тако добијене форме хамилтонијана значајне као општи прототипови многочестичних проблема, независно од магнетизма.

Стога текст почиње специфичним прегледом постојећих модела, са нагласком на прецизном квантно-механичком формализму, што је резултовало издвајањем свега неколико битних физичких поставки и приступа довољних за методично извођење, систематизацију, и у формалном смислу класификацију квадратних хамилтонијана. Иако за разлику од осталих глава, ова не садржи оригиналне доприносе, била је неопходна не само као допуна, у том смислу чини се мањкаве постојеће литературе, већ и за оцену стварних домета примене касније добијених резултата.

Симетријска анализа почиње у другој глави, где се дефинише основни објекат проучавања, спинска решетка. Уз неопходну математичку прецизност, уводи се квантни спински хамилтонијан, анализирају његове компоненте и њихове трансформационе особине значајне за наговештене циљеве истраживања.

У трећој глави се групно-теоријским техникама класификују компоненте тензора интеракције компатибилних са симетријом квази-једнодимензионалних система. Поред потпуне генерализације Моријиних правила (оригинално уведених само за Џалошински-Моријин вектор) на све компоненте овог тензора, од резултата треба поменути утачавање појмова изотропије и хомогености у физици нискодимензионалних кристала (уз отклон у односу на стандардно схватање), те скаларност једне од компоненти Џалошински-Моријиног вектора, које можда даје концептуално објашњење честог хелимагнетизма ових структура.

Многочестичност изискује приближне приступе, а стандардни у оквиру магнетизма је квази-класична апроксимација. Усредњавањем спинских оператора у сепарабилним квантним стањима, добијају се класични спински вектори, а варијациони проблем одређивања основног стања се изражава као оптимизација квадратне форме по овим векторима. Истовремено, из форме функционала енергије се издваја тензор интеракције у форми матрице, тзв. класични хамилтонијан, димензије пропорционалне броју атома. Анализа из главе 2, одмах открива симетрију класичног хамилтонијана. Међутим, услови једнакости дужина класичних спинова (код физичких квазикласичних стања, укључујући основно) се јављају као везе (Глава 4). Својствена стања класичног хамилтонијана не морају да их испуне, те је важно одредити класу система код којих би она била аутоматски задовољена. Испоставља се да се проблему може прићи симетријски. Прво, увођење спинских репрезентација омогућава да се дефинишу и потпуно класификују [1,2,3,5] њима генерисана регуларна спинска уређења (Глава 5). Затим је показано (Глава 6) да функционал енергије код таквих уређења може да се изрази у једноставнијој форми, уз коришћење само представника орбита и са њима интерагујућих суседа [2,3]. Додатно, комутација хамилтонијана са спинском репрезентацијом омогућава да основно квази-

класично уређење буде регуларно, а даје јасан и ефикасан алгоритам његовог одређивања раније развијеном техником групних пројектора. Са друге стране, симетријски услови се могу изразити групним суперпројекторима, чиме се добија лако применљиви критеријум моделирања, тј. одређивања класе хамилтонијана са регуларним основним стањем. Стандардна квази-класична теорија магнетизма завршава се својеврсним повратком у квантни домен при проучавању ниско-енергијске динамике кроз спинске таласе, тј. магنونске ексцитације основног стања. У складу са тим, за разматрана основна стања, регуларна уређења, прилагођена је симетријска техника ефикасног решавања дисперзионих једначина.

Како се за разлику од аналогног фононоског или електронског проблема у спинском случају појављује метрика нетривијалне сигнатуре (која обезбеђује бозонску природу магнона, тј. бозонске комутиционе релације оператора побуда), примењује се Богољубов-Валентин-ова дијагонализација. У случају да метрика комутира са спинском репрезентацијом основног стања, спектар се налази у складу са раније развијеним симетријским методима. У противном случају ово није могуће, али су анализирани случајеви када се нетривијалном модификацијом истог метода добијају магنونске дисперзије.

Тиме је остварен циљ истраживања: пуна симетрија је систематски уграђена у квази-класичну (и квантну у сегменту анализе тензора интеракције) теорију магнетизма, уз детаљно разрађивање закључака за случај квази-једнодимензионалних система. Последња глава као искључиви циљ има илустрацију развијених метода. За то су одабране недавно синтетисане нанотубе са угљениковим изотопом  $^{13}\text{C}$ . Покретни електрони доводе до Рудеман-Кител-Касуја-Јосида интеракције магнетних момената језгара. Због њеног изразито дугачког домета (обухвата десетине или стотине хиљада атома, у зависности од нанотубе), овакав проблем далеко премашује догледне могућности чисто нумеричке оптимизације. Међутим, у раду развијене технике су свеле проблем на нумерички решив за релативно кратко време и на персоналним рачунарима, па чак дозволиле аналитичко решење у лимесу бесконачних туба. Добијени резултати [2] показују да су ова уређења планарни хелимагнети, при чему на хеликалност утичу не само тип нанотубе, већ и њена дужина, али и напоном успостављени хемијски потенцијал. Ово се може искористити како за пројектовање нпр. спинтроничких уређаја, или карактеризацију нанотуба дифракционим мерењима. Континуална дегенерација основног стања је узрок Голдстоновог мода. Ово је потврђено и израчунатим и кратко дискутованим (хели)магنونским дисперзијама. Можда и најважнији од физичких закључака је универзалност, у смислу независности од типа нанотубе) резултата када се користе специјално одабране бездимензионе величине, тј. њихова независност од нанотуба, уз индикацију да се могу пренети и на сва квази-једнодимензионалне системе са Рудеман-Кител-Касуја-Јосида интеракцијом.

### 2.3. Методологија

У раду се као основно средство користе напредне групно-теоријске технике у оквиру формализма квантне-механике. Ово се односи и на велики део рада повећан квази-класичној апроксимацији, јер је математички оквир који се добија урађеном прецизном

анализом потпуно аналоган квантно-механичком: простор стања је проширен до амбијентног векторског простора, дејство група је линеарно. Индуктивност тог простора је омогућила коришћене технике модификованих пројектора. Ригорозан приступ се огледа и у постојању додатка, у коме је изведен низ доказа теорема који су били неопходни да би се добили главни резултати (а ометали би прегледност главног текста).

Додатно, извршена је нумеричка имплементација теоријских резултата. Програми урађени у симболичком језику „Mathematica“ омогућили су анализу већег броја нанотуба, потврђујући ефикасност и тачност претходно теоријски разрађеног приступа.

### 3. Списак објављених чланака

Из овог рада су произашли чланци [2], [3] и [5], и део садржаја чланка [1], док је део резултата у припреми за публикавање.

- [1] M. Milivojević, N. Lazić, T. Vuković and M. Damnjanović,  
*Regular phases of quasi-one-dimensional spin systems: Classification and imprints on diffraction*,  
*Physical Review B* **92** (2015) 165410
- [2] N. Lazić and M. Damnjanović,  
*Spin ordering in RKKY nanowires: Controllable phases in 13C nanotubes*,  
*Physical Review B* **90** (2014) 195447
- [3] N. Lazić, M. Milivojević, M. Damnjanović,  
*Spin line groups*,  
*Acta Crystallographica A*, **69** (2013) 611-619
- [4] N. Lazić, T. Vuković, G. Volonakis, I. Milošević, S. Logothetidis and M. Damnjanović,  
*Natural torsion in chiral single-wall carbon nanotubes*,  
*J. Phys.: Condens. Matter* **24** (2012) 485302
- [5] N. Lazić, M. Milivojević, M. Damnjanović,  
*Spin arrangements of the first family line groups*,  
*Phys. Status Solidi B* **249** (2012) 2558–2561
- [6] T. Vuković, N. Lazić, I. Milošević, M. Damnjanović,  
*Symmetry of chiral nanotubes: Natural torsion and diffraction evidence*,  
*Phys. Status Solidi B* **249** (2012) 2446–2449

## ЗАКЉУЧАК

Из наведеног је јасно да је предложени рад *Quasi-classical ground states and magnons in monoperiodic spin systems* (Квази-класична основна стања и магнони у монопериодичним спинским системима) Наташе Лазић, дипломираног физичара, озбиљан и оригиналан допринос сагледавању улоге симетрије и њеном коришћењу у физици магнетизма, пре свега код квази-једнодимензионалних система. Узимајући у обзир савременост теме, начин презентације, произишле чланке и квалитет часописа у којима су истраживања објављена, **предлажемо Наставно-научном већу Физичког факултета да одобри јавну одбрану ове докторске тезе.**

Београд, 29.5.2016.



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



Зоран С. Поповић, Научни саветник  
Институт за нуклеарне науке „Винча“



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



Ђорђе Спасојевић, Ванредни професор  
Физички факултет, Универзитет у Београду



Владимир Дамњановић, Научни сарадник  
Институт за Физику, Београд