

## Научном већу Института за физику у Београду

### Извештај комисије за избор др Чедомира Петровића у звање научни саветник

На седници Научног већа Института за физику у Београду одржаној 13. 7. 2021. године именовани смо у комисију за избор др Чедомира Петровића у звање научни саветник.

Др Чедомир Петровић је запослен је у Националној лабораторији Брукхејвен (БНЛ), САД, од 2002. године и до сада није биран у научна звања у Србији. Чедомир Петровић је развио изузетну научну каријеру и његова група за синтезу и карактеризацију материјала на БНЛ-у је међу најпризнатијима у свету. Он је током своје каријере имао већи број радова са кључним открићима која су отворила нова поља истраживања како у области фундаменталне физике, тако и у науци о материјалима. Од 2009. године активно сарађује на пројектима Центра за физику чврстог стања и нове материјале, Центра изузетних вредности у оквиру Института за физику у Београду, а 2015. године изабран за иностраног члана САНУ.

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

Чедомир Б. Петровић, научник у Националној Лабораторији Брукхејвен, придружени редовни професор универзитета Џонс Хопкинс и Стони Брук, рођен је 20. јануара 1971. у Београду, где је завршио осмогодишњу (1985) и Прву економску средњу школу (1989). Војни рок је одслужио у противваздушној одбрани ЈНА 1989.-1990. у ваздухопловној бази Жељева поред Бихаћа у 200. лако артиљеријско-ракетном пуку ЈНА. На Физичком Факултету Универзитета у Београду је дипломирао 1996. године на одсеку теоријска физика. Те исте године одлази на постдипломске студије на Државном универзитету Флориде у Талахасију, Сједињене Америчке Државе. Магистрирао је 1997. године а одбранио докторат у септембру 2000. године на истом универзитету у Националној лабораторији за висока магнетна поља где је радио истраживања од фебруара 1997. године. Навећи део истраживачког рада на тези Чедомир Петровић је спровео у одеску за науку о материјалима Лос Аламос Националне лабораторије у Новом Мексику (1998-2000). Докторску тезу је урадио у области физике јако корелисаних материјала са специјализацијом на раст кристала, развој нових материјала и мерење транспортних, термалних и термодинамичких особина у екстремним условима (ниске температуре, високи притисци и висока магнетна поља).

Научна усавршавања Чедомир Петровић је наставио као постодок у Ејмс Лабораторији у Ајови од 2000. до 2002. године након чега долази на департман за физику Брукхејвен националне Лабораторије (БНЛ) као assistant scientist на тзв. tenure-track-у где прави нову лабораторију за раст кристала и карактеризацију материјала и где наставља научну каријеру до данас. Associate Scientist постаје 2004., а Scientist постаје 2006. године. Tenured scientist постаје 2008. године. Године 2007. Чедомир постаје adjunct assistant professor of physics на Департману за физику и астрономију Џонс Хопкинс универзитета, а 2008. године постаје инострани члан Канадског института за напредна истраживања (Canadian Institute for Advanced Research) као и гостујући професор физике на Институту за физику чврстог стања Универзитета у Токију, Јапан. Године 2009. и 2010. Чедомир постаје adjunct professor of physics на Департману за физику и астрономију Џонс Хопкинс Универзитета и добија исто звање (adjunct professor of physics) на Департману за физику и астрономију Стони Брук Универзитета. Као гостујући професор Чедомир проводи укупно 12 месеци у периоду од 2011. до 2014. године у Лабораторији за Висока Магнетна Поља Хелмхолц Центра Дрезден – Росендорф (на

сабатикалу БНЛ) као Humboldt Fellow на програму за сениор истраживаче. Изабран је за иностраног члана Одељења техничких наука САНУ 2016 године, у то време као најмлађи члан Академије, а исте године постаје и adjunct Professor of Materials Science на департману за науку о материјалима Стони Брук Универзитета. Осим свог основног гранта у оквиру Министарства енергије САД, Чедомир је био један од главних истраживача (Co-PI) у две велике активности исте институције: Центра за суперпроводност (2009-2018) и Центра за компјутерски дизајн јако корелисаних материјала (2015-2019).

Научноистраживачка активност Чедомира Петровића одвија се у оквиру фундаменталне физике чврстог стања и физике материјала, највећим делом на јако корелисаним електронским системима. Према бази Web of Science на дан 17. 6. 2021. године његови радови су цитирани 10392 пута, односно 9626 пута ако се урачунају само хетероцитати, уз h-индекс једнак 46. Посебно се истиче велики допринос образовању новог научнонаставног кадра. У досадашњој каријери Чедомир Петровић је образовао низ студента, постдокова и старијих научника. Велики број од њих тренутно ради на истакнутим местима у Кини, Јужној Кореји и САД.

## 2. Преглед научне активности

Чедомир Петровић је као аутор или коаутор објавио 286 научних радова у научним часописима са рецензијом и један патент, са преко 10,000 цитата по бази података Web of Science или преко 14,000 цитата по Google Scholar бази података која укључује и радове цитиране у архив.org облику, од постављања на препринт сервер до објављивања у часопису.

Чедомир Петровић је био један од водећих истраживача (primary investigator) Истраживачког центра енергетског фронта Министарства за енергију САД за суперпроводност на БНЛ-у. Био је један од коаутора Панела о развоју суперпроводности 2006. године (вероватно најмлађи) а и Панела о основним потребама за синтезу материјала за исту институцију 2016. године. Чедомир је био и један од руководиоца (задужен за експериментални део) Центра за компјутерски дизајн материјала и спектроскопију (<https://www.bnl.gov/comscope/>). Последњих година Чедомир активно сарађује са нанотехнолошким центром у оквиру БНЛ-а на нанофабрикацији кристала као и на методама анализе структурних особина материјала са X-зрацима на синхротрону NSLS2.

Чедомир Петровић је рецезент великог броја најугледнијих светских часописа из физике материјала и сродних области као на пример: Nature Materials, Nature Physics, Nature Communications, Nature Scientific Reports, Phys. Rev. X, Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. B, Chem. Mat., Journal of the American Chemical Society, Inorganic Chemistry и других. Осим тога, рецезент је за истраживачке предлоге US Department of Energy, US National Science Foundation, European Research Council, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Israel Science Foundation као и за експерименталне предлоге великих истраживачких института: National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL), Stanford Synchrotron Radiation Laboratory. Био је члан NHMFL саветодавног комитета корисника 2012-2014 и тренутно је члан editorial board-а часописа Physica C. Ко-организатор је 16. америчке конференције за раст кристала и епитаксију 2005. године као и Симпозијума о Физици Кондензоване Материје у Београду 2019 године.

## Организација и стварање услова за научно-истраживачки рад

Још као студент у Лос Аламосу Чедомир Петровић изграђује своју лабораторију у простирији која је раније служила као складиште По доласку на БНЛ 2002. године гради нову лабораторију за истраживачку синтезу материјала. БНЛ до тада није имала лабораторије ни опрему за синтезу и карактеризацију материјала, а највећи део активности физике чврстог

стања се водио на синхротрону и на неутронском реактору. У лабораторији је развио неколико нових метода синтезе. Учествовао је у дизајну нове зграде и нових лабораторија за интердисциплинарна истраживања на БНЛ-у где је преселио своју лабораторију 2013. године а затим је више од годину дана управљао истом даљински за време сабатикала (Хумболдт гранта) у Дрездену у периоду 2012-2014.

### **Наставна делатност**

Наставна делатност Чедомира Петровића укључује курс на постдипломским студијама 2008. године на Департману за физику и астрономију Џонс Хопкинс Универзитета као и држање наставе на летњој школи Канадског института за напредна истраживања на Брокхаус институту МекМастер Универзитета 2010. године.

### **Стручнији и шири опис научне делатности**

Научноистраживачки рад Чедомира Петровића фокусиран је на синтезу и карактеризацију материјала у физици чврстог стања и на синтезу материјала специјализовану за одређене експерименталне методе физичке и структурне карактеризације. Жижа интересовања су феномени везани за електронске корелације у материјалима релевантним за енергетику и информационе технологије. Пошто су опсервабле најчешће векторске величине, материјали се углавном праве у облику монокристала. Са техничке стране Чедомиров програм синтезе користи методе погодне за истраживачку синтезу материјала и комбинује их са широким спектром структурних, транспортних, термалних, термодинамичких и магнетних мерења, понекад на великим постројењима као што су лабораторије за висока магнетна поља (САД, Немачка) и синхротронски извори (САД).

#### **• Суперпроводници и полупроводници са тешким фермионима**

Тешки фермиони су интерметална једињења у којима се налазе “тешке” електронске квазичестице са електронском густином стања која је неколико редова величине већи него у типичним металима попут бабра због Кондо (Абрикосов-Сул) резонанце која потиче од интеракције електрона из проводних зона са локализованим обично  $f$ , а понекад и  $d$ , електронима који су носици магнетних особина. Како изолаторска ( $\rho \rightarrow \infty$ ) тако и суперпроводна стања ( $\rho \rightarrow 0$ ) су од великог интереса због могућности да су магнетне интеракције уграђене у формирање (суперпроводног или полупроводног) енергетског процепа што се не уклапа у конвенционалне теорије. Историјски гледано, тешки фермиони су били први материјали код којих је доказана неконвенционална суперпроводност где се у суперпроводном стању нарушавају и друге групе симетрије Хамилтонијана а не само  $U(1)$ .

Почетком две хиљадитих Чедомир Петровић је синтетисао, тј. пронашао метод синтезе за кристале и мерењима открио нову класу суперпроводних тешких фермиона  $CeMIn_5$  ( $M = Co, Rh, Ir$ ). Новим мерењима показано је да је суперпроводност тешких фермиона индукована притиском представља запремински (балк) феномен. До ових радова су сва открића суперпроводности индуковане притиском била мерена само преко отпора. Да би то урадио, Чедомир је калибрисао мерење магнетне суспектибилности која се мери симултано са отпором у хелији за притисак и тако су откривени  $CeIrIn_5$  и  $CeRhIn_5$  као и  $Ce_2RhIn_8$ . Хемијским супституцијама Чедомир је синтетисао  $CeRh_{1-x}Rh_x$  серију материјала где суперпроводност и магнетизам коегзистирају. Међутим, најзначајније откриће била је суперпроводност тешких фермиона на 2.3 K у  $CeCoIn_5$  кристалима. То је тада (а и још увек је) био светски рекорд критичне температуре у тој класи материјала. Веома значајно је што је суперпроводност откривена не у једном материјалу већ у целој фамилији а што је умногоме олакшавало утврђивање везе између кристалне структуре, хемијске композиције и физичких феномена.

Мада на први поглед скромна,  $T_c$  од 2.3 К омогућила је велики број експеримената на основу којих су се значајно увећала сазнања о суперпроводности на ивици магнетног уређења. Нарочито се продубило разумевање како нискодимензионална кристална структура утиче на анизотропију електронске структуре у импулсном простору и на анизотропију магнетне кохеренционе дужине у тзв. РККУ механизму магнетизма, и како обе утичу на јачину спаривања Куперових парова. У периоду постдокторског усавршавања и у раном периоду доласка на БНЛ Чедомир је открио нови Кондо изолатор,  $\text{FeSb}_2$  који, како се касније показало, има највећу измерену вредност термоснаге од свих материјала у природи. Гвожђе диантимонид је био први Кондо изолатор материјал са  $d$  електронима откривен после  $\text{FeSi}$ , а од њега се разликовао по некубичној кристалној структури.

- **Магнезијум диборид**

Почетком двехиљадитих, у тиму истраживача са Ејмс лабораторије (Ames Laboratory) Чедомир је открио методу синтезе прахова, жица и филмова  $\text{MgB}_2$  напаравањем објеката од борона у пари магнезијума. То је омогућило ригорозну карактеризацију суперпроводног стања у низу радова, на пример изотопски ефекат бора демонстрирао је фононски механизам суперпроводности иако је критична температура суперпроводности тог материјала блиска, ако не и виша од многих бакарних оксида. Продор у синтези је резултовао и патентом прављења  $\text{MgB}_2$ . Вреди напоменути да се  $\text{MgB}_2$  данас комерцијално користи у магнетима за магнетну резонанцу као и за разне друге суперпроводне каблове због једноставне израде жица и ниске цене. У последње време, због изузетно мале масе суперпроводног магнезијум диборида, разматрају се и авионски мотори на бази  $\text{MgB}_2$ .

- **Усавршавање синтезе суперпроводних и полупроводних тешких фермиона**

За извођење експеримената на 115 материјалима потребно је било направити велике и чисте кристале (са минимизованим дефектима). То је био предмет рада у наредном периоду када Чедомир подиже лабораторију и формира групу на Департману за физику (касније Департману за физику чврстог стања и науку о материјалима) у Брукхејвен националној лабораторији (Brookhaven National Laboratory). У другој половини двехиљадитих Чедомирова група се фокусира на прављење екстремно чистих кристала 115 суперпроводника за мерења анизотропије суперпроводног процепа и разних феномена у високим магнетним пољима, на квантној критичној тачци, углавном у сарадњи са групама специјализованим за термалну проводност. Чедомир је произвео вероватно најчистије и највеће суперпроводне тешке фермионе на свету на примеру 115 и  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  кристала. Рецимо, монокристали  $\text{CeRhIn}_5$  су направљени са резидуалним отпором  $\rho \sim 37 \text{ n}\Omega \text{ cm}$ , а што је рекорд за било које тернарно једињење. То је омогућило извођење кључних експеримената за проучавање нискотемпературног термалног транспорта, нарушења Видеман-Франц закона, нееластичног расејања неутрона и скенирајућу тунелну микроскопију чиме је по први пут у неком суперпроводном тешком фермиону показана дистрибуција енергијског процепа на појединачним електронским зонама.

Даљи развој синтезе и карактеризације корелираних полупроводника на бази  $\text{FeSb}_2$  касних двехиљадитих и почетком двехиљадесетих довео је до открића низа интересантних феномена, као на пример високотемпературне локализације у  $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Sb}_2$ , Грифитсових фаза и открића највећег термоелектричног фактора снаге у природи. Напредне методе синтезе и сарадња са трансмисионом електронском микроскопијом и неутронском дифракцијом довеле су до недавног открића да се гигантска термоелектрична снага може манипулисати ваканцијама антимона. Тренутни рад на материјалима у овој класи (како  $\text{FeSb}_2$  тако и  $\text{CrSb}_2$ ) указује на површинска стања чији тополошки карактер је предмет садашњег и будућег истраживања.

- **Материјали са таласном густином наелектрисуња**

Крајем двехиљадитих и почетком двехиљадесетих и све до данас, Чедомирова истраживачка група је открила, синтетисала и карактерисала велики број суперпроводника са таласном густином наелектрисуња (charge density wave, CDW). Главни циљ ових радова је да се омогући испитивање теорија о квантној критичности индуковане супресије CDW, а по аналогији са магнетним квантним критичним тачкама где квантна критичност настаје истискивањем магнетног уређења са таласом спинске густине (spin density wave, SDW). Примери укључују  $M_xZrTe_3$  ( $M=Cu, Ni$ ),  $ZrTe_{3-x}Se_x$ ,  $Ir_{1-x}Rh_xTe_2$ ,  $Ca_3Ir_4Sn_{13}$ ,  $2H-TaSe_{2-x}S_x$ , итд.

- **Гвоздени суперпроводници**

Чедомирова истраживачка група на БНЛ-у се одмах након открића гвоздених суперпроводника 2006. године интензивно укључује у њихово проучавање, најпре кроз синтезу првих чистих FeSe, мерење Паулијевог ограничења у горњем критичном пољу у  $FeTe_{1-x}Se_x$  и откриће суперпроводности у  $FeTe_{1-x}S_x$ . Открићем метода синтезе и суперпроводности у  $K_xFe_{2-y}Se_{2-x}S_x$  ( $0 \leq x \leq 2$ ) кристалима настаје први фазни дијаграм у суперпроводним халкогенидима гвожђа где прелаз из суперпроводне у изолаторску фазу настаје хемијском супституцијом. Значајно је поменути и прве термоелектричне студије како  $K_xFe_{2-y}Se_2$  тако и допираних  $K_xFe_{2-y}(Se,S)_2$  кристала која су врло рано указала на разлике са бакарним оксидима. Од много значајних резултата у овом периоду издвајају се и синтеза и карактеризација материјала са јаким пиновањем флукса (важно за примене) као и открића изолаторских материјала сродних суперпроводницима, на пример квадратне (square) или мердевинасте (ladders) решетке гвоздених атома (ове последње је истовремено независним радом од нашег открила и група Hai-Hu Wen-a, сада на Нанцинг Универзитету). Ова открића су отворила ново поље само за себе које је активно и до данас; на пример показало се да су на веома високим притисцима мердевинасте решетке суперпроводне са критичном температуром веома блиској максималној температури код гвоздених суперпроводника, а што је много више него код мердевинастих решетки бакар оксида. Низ радова посвећен механизму горњег критичног поља и феноменима у импулсним магнетним пољима резултирао је ревијалним радом по позиву у часопису Science and Technology of Advanced Materials где је сумирано стање у тој области науке. Једно од значајних открића у ултрависоким пољима у Дрездену био је суперпроводник-изолатор прелаз у допираном  $K_xFe_{2-y}Se_2$  где отпор  $\rho_{ab}$  расте логаритамски кад  $(T/T_c) \rightarrow 0$  у нормалном стању када високо магнетно поље сузбије суперпроводност, слично бакарним оксидима и грануларним суперпроводницима типа I, а што указује на важност интринзичне фазне сепарације у структурно комплексним екзотичним материјалима. У последње време, контрола интерстицијалног гвожђа у  $Fe_{1+y}Te(Se,X)$   $X = Se, S$  доводи до омогућавања комбинованих студија фотоемисије и неутронског расејања која показују хемијску везу између суперпроводности и тополошких стања. Такође, Чедомирова група је открила и нови материјал  $SrFBiS_2$  који је био основни материјал чијим допирањем су откривени нови суперпроводници на бази бизмут сулфида, са структуром сличном гвозденим суперпроводницима.

- **Дирак и Вејл кристали**

Од почетка двехиљадесетих и све до данас Чедомирова истраживачка група на БНЛ-у је активна у проучавању Диракових стања у различитим кристалима. Нискодимензиона Диракова стања су у почетку била асоцирана са квантним тачкама, површинама тополошких изолатора и графеном. Тражећи начина да истражи међусобни утицај јаких електронских корелација и тополошких стања, Чедомирова група је открила дводимензионалне Диракове фермионе у кристалима  $SrMnBi_2$  и  $CaMnBi_2$ . Показано је да Диракова стања битно утичу на

магнетотермоелектричну снагу. Овај рад је привукао доста пажње: као што је речено у Nature Physics ревијалном раду, корени тополошке антиферромагнетне спинтронике се налазе студијама која је Чедомирова група радила на SrMnBi<sub>2</sub> типу материјала. Од тада, Чедомирова група је открила Диракова стања у многим тополошким материјалима са заједничким Bi, Sb или P структурним блоковима (деловима кристалне структуре), потврђујући или мотивишући теоријске радове. То је допринело да се такви блокови препознају као корисни неоргански “синтони” за склапање Диракових и Вејл материје у многим кристалима са различитом симетријом кристалне решетке. Недавни резултат, откриће да се скирмиони могу детектовати термоелектричним мерењима на собној температури у магнетном материјалу Fe<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub> са магнетном решетком Кагоме типа и масивним Дираковим фермионима отвара ново поље манипулације скирмиона у информационом технологијама користећи једноставне градијенте температуре.

- **Дводимензионални ван дер Валс магнетни кристали**

Дводимензиони материјали са slabим ван дер Валс (vdW) хемијским везама између атомских слојева и јаким ковалентним везама унутар атомских слојева су идеална надоградња графена али и материјали за које се сматра да ће бити од важности у електроници будућности. Дихалкогениди транзиционих метала и остали халкогениди такође могу имати Вејл стања али се користе и у суперпроводним и спинтронским нано технолошким уређајима. Чедомирова група је синтетисала, карактерисала и открила низ таквих материјала, нарочито магнетних халкогенида са vdW везама који се могу екслофилити у танке слојеве где дугодометно магнетно уређење опстаје због јаке униаксиалне анизотропије. Фокус је био како на студијама Холовог ефекта у проводним кристалима (на пример Fe<sub>2.7</sub>GeTe<sub>2</sub> и Cr<sub>5</sub>Te<sub>8</sub>) тако и на магнетним критичним [видети рецимо CrI<sub>3</sub> (избор едитора)] и магнетокалоричним особинама (рецимо CrCl<sub>3</sub> или Mn<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>). Висококвалитетни кристали из Чедомирове групе су искоришћени за прву детекцију магнетних скирмиона трансмисионом електронском крио-Лоренц микроскопијом, првом у vdW материјалима. Низ радова на ту тему резултирао је ревијалним поглављем по позиву за ACS Nano монографију “*The Magnetic Genome of Two-Dimensional van der Waals Materials*” (тренутно у штампи).

- **Техничке иновације**

Чедомир Петровић је активан и у развоју техничких метода раста кристала. То укључује не само иновативне хемијске растворе за синтезу ултрачистих или великих интерметалних кристала, већ и нове пећи у којима се раздвајање кристала из металног растопа врши унутар пећи, а не изван као што користе све групе овог типа на свету. Та пећ и та метода тренутно не постоје нигде осим у Чедомировој лабораторији. Осим тога, Чедомир је дизајнирао и пећ за хемијски транспорт и депозицију која може да створи градијент од 1000 целзијуса и која је такође јединствена на свету. Вреди напоменути да је усавршавањем метода депозиције нанокристала Чедомирова група недавно синтетисала ултратанке (до монослоја) кристале материјала који немају vdW хемијску везу у кристалној структури а што је заједничка карактеристика скоро свих ултратанких кристала који су прављени до сада.

### 3. Елементи за квалитативну анализу рада

#### 3.1 Квалитет научних резултата

##### 3.1.1 Научни ниво и значај резултата, утицај научних радова

Др Чедомир Петровић је у свом досадашњем раду објавио 271 рад у међународним часописима са ISI листе, од којих 51 у категорији M21a, 179 у категорији M21, и 11 у категорији M23. У последњих 15 година је објавио 233 рада у међународним часописима са ISI листе од којих 33 у

категорији M21a, 167 у категорији M21, 22 у категорији M22 и 11 у категорији M23. Као пет најзначајнијих радова кандидата могу се узети (број цитата је дат на основу базе Web of Science):

1. Spin resonance in the d-wave superconductor CeCoIn<sub>5</sub>, C. Stock, C. Broholm, J. Hudis, H. J. Kang and **C. Petrovic**, Phys. Rev. Lett. 100, 087001 (2008), M21a, ИФ=7.301, цитиран 222 пута
2. Pauli-limited upper critical field of Fe<sub>1+y</sub>Te<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>, H. Lei, R. Hu, E. S. Choi, J. B. Warren and **C. Petrovic**, Phys. Rev. B 81, 094518 (2010), M21, ИФ=3.774, цитиран 100 пута
3. Imaging Cooper pairing of heavy fermions in CeCoIn<sub>5</sub>. M. P. Allan, F. Masee, D. K. Morr, J. Van Dyke, A. W. Rost, A. P. Mackenzie, **C. Petrovic** and J. C. Davis, Nature Physics 9, 468 (2013), **M21a, ИФ=20.603, цитиран 138 пута**
4. Anisotropic giant magnetoresistance in NbSb<sub>2</sub>, Kefeng Wang, D. Graf, Lijun Li, Limin Wang and **C. Petrovic**, Scientific Reports 4, 7328 (2014), M21a, ИФ=5.578, цитиран 117 пута
5. Room-temperature Skyrmion Thermopower in Fe<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>, Q. Du, M. G. Han, Y. Liu, W. Ren, Y. Zhu and **C. Petrovic**, Advanced Quantum Technologies 3, 2000058 (2020), (објављен у септембру 2020)

У раду 1 демонстрирана је могућност нееластичног расејања неутрона на *heavy fermion* суперпроводнику CeCoIn<sub>5</sub>. То је прво мерење магнетних ексцитација и спинских флукуација у овом материјалу. Таласни вектор магнетног уређења је врло сличан CeIn<sub>3</sub> као и магнетна кохеренциона дужина. Дакле, магнетна анизотропија се не разликује много од тродимензионалних тешких фермиона. Међутим, оштра спинска резонанца настаје уласком у суперпроводно стање што указује на јаку везу између *f* електрон магнетизма и суперпроводности која није изотропна на Ферми површи већ има облик *d* таласа. *Допринос: синтетисао кристале и тиме омогућио експеримент у сарадњи са групом за расејање неутрона на Џонс Хопкинс Универзитету.*

У раду 2 демонстрирано је врло велико горње критично поље у суперпроводнику на бази гвожђа. Анизотропија поља је врло мала и скоро сасвим нестаје кад  $T \rightarrow 0$ . Анализа механизма горњег критичног поља демонстрира приличан спин парамагнетни механизам сламања куперових парова. Ово је један исечак из серије радова о открићу и карактеризацији разних гвоздених суперпроводника у високим магнетним пољима, а који су сабрани у ревијалном раду (монографији) по позиву: Iron chalcogenide superconductors at high magnetic fields, Hechang Lei, Kefeng Wang, Rongwei Hu, Hyejin Ryu, Milinda Abeykoon, Emil S. Bozin and C. Petrovic, Sci. Technol. Adv. Mater. 13, 054305 (2012). *Допринос: осмислио је тему рада и руководио радом као шеф групе, ментор студентима и постдокторским истраживачима.*

У раду 3 први пут је експериментално утврђен енергетски процеп на појединим зонама у импулсном простору на неком суперпроводнику из фамилије тешких фермиона. Преко интерференције Богољубов квазичестица методом скенирајућег тунелног микроскопа то је урађено на кристалима CeCoIn<sub>5</sub>. Енергијски процеп је највећи на електронским стањима која одговарају тешким електронима са великим кристалним импулсом, и сагласан је са  $d_{x^2-y^2}$  симетријом као код бакарних оксида. Заједно са радом Direct evidence for a magnetic *f*-electron-mediated Cooper pairing mechanism of heavy-fermion superconductivity in CeCoIn<sub>5</sub>, J. S. Van Dyke, F. Masee, M. P. Allan, J. C. Seamus Davis, C. Petrovic and D. Morr Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 32, 11663 (2014) заокружује доказивање преко експеримента и теорије да се Куперови парови у тешким фермион суперпроводницима спарују преко магнетне интеракције. *Допринос: синтетисао кристале и тиме омогућио експеримент у сарадњи са групом за скенирајућу тунелну микроскопију са БНЛ/Корнел универзитета.*

У раду 4 откривен је несатурисан и анизотропан гигантски магнетоотпор у ниобијум диантимониду релативно једноставне кристалне структуре који показује карактеристике Дираковог семиметала. Магнетно поље индукује сламање симетрије временске инверзије шти може да доведе до реконструкције Диракове ферми површи. Дибизмутни материјали повезани са NbSb<sub>2</sub> показују не само квази дводимензионални транспорт са Дираковим стањима у кристалној структури слично површинама тополошких изолатора већ и контролу минимума енергијских стања у кристалу путем магнетног поља. Ово је део серије радова о Дираковим стањима у кристалима материјала са јаким електронским корелацијама у 112 структурама (видети листу публикација). *Допринос: осмислио је тему рада и руководио радом као шеф групе, ментор студентима и постдокторским истраживачима.*

У раду 5 приказана је прва термоелектрична детекцију скирмиона на собној температури у простом термалном градијенту у квази димензионом кристалу  $\text{Fe}_3\text{Sn}_2$ , Kagome Dirac материјалу са тешким Дираковим фермионима. Скирмионске структуре су пример конволуције јаких електронских корелација и тополошких карактеристика материјала. Резултати отварају могућност развоја технологија за складиштење информација и спинске калориметрије користећи манипулацију скирмиона преко термалног градијента. Рад је део серије радова о димензионом магнетним материјалима која кулиминира са ревијалним радом (монографијом) по позиву за ACS Nano који ће бити објављен 2021 године. *Допринос: осмислио је тему рада и руководио радом као шеф групе, ментор студентима и постдокторским истраживачима.*

### 3.1.2 Позитивна цитираност научних радова кандидата

Према бази Web of Science на дан 17. 6. 2021. године радови Чедомира Петровића су цитирани 10392 пута, односно 9626 пута ако се урачунају само хетероцитати, уз h-индекс једанк 46.

### 3.1.3 Параметри квалитета часописа

#### Укупна Каријера

	ИФ	М	СНИП
Укупно	$\Sigma\text{ИФ}_i=1115,984$	$\Sigma\text{М}_i=1861,64$	$\Sigma\text{СНИП}_i=399,263$
Усредњено по чланку	$\Sigma\text{ИФ}_i/\text{Ч}=4,118$	$\Sigma\text{М}_i/\text{Ч}=6,87$	$\Sigma\text{СНИП}_i/\text{Ч}=1,473$
Усредњено по аутору	$\Sigma(\text{ИФ}_i/\text{А}_i)=201,201$	$\Sigma(\text{М}_i/\text{А}_i)=383,037$	$\Sigma(\text{СНИП}_i/\text{А}_i)=75,319$

#### Последњих 15 година (од 1. јуна 2006.)

	ИФ	М	СНИП
Укупно	$\Sigma\text{ИФ}_i=987,548$	$\Sigma\text{М}_i=1593,62$	$\Sigma\text{СНИП}_i=338.296$
Усредњено по чланку	$\Sigma\text{ИФ}_i/\text{Ч}=4,238$	$\Sigma\text{М}_i/\text{Ч}=6,84$	$\Sigma\text{СНИП}_i/\text{Ч}=1.452$
Усредњено по аутору	$\Sigma(\text{ИФ}_i/\text{А}_i)=183,94$	$\Sigma(\text{М}_i/\text{А}_i)=341.509$	$\Sigma(\text{СНИП}_i/\text{А}_i)=66.304$

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

Опис је дат у одељку 3.7 као и у списку пет најзначајнијих радова.

### 3.1.5 Награде

- Српска физичарска награда "Марко Јарић" за 2009. годину
- Humboldt fellowship for Experienced Researchers 2011-2014,
- Српска Академија Наука и Уметности – инострани члан (од 2015. године),
- APS Fellow изабран 2016. године

### 3.1.6 Елементи применљивости научних резултата

Научни резултати кандидата су из базичне науке која је чини основу за разумевање и синтезу материјала који се користе у енергетици и информационим технологијама. Рад на једињењу  $\text{MgB}_2$  резултирао је патентом за његову синтезу из 2002. године.



### 3.2 Ангажовање у формирању научних кадрова

Др Чедомир Петровић је до сада био ментор три одбрањене докторске дисертације (Rongwei Hu, Hyejin Ryu, Qianheng Du) и две чија је израда у току (Zhixiang Hu, Shuzhang Chen).

1) Rongwei Hu (2005-2009) је дисертацију одбранио 2009. године на Brown Универзитету. (Следећа позиција: Ameslab постдок. Тренутна позиција: Rutgers Center for Advanced Materials, научник.)

2) Hyejin Ryu (2010-2014) је дисертацију одбранио 2014. године на Stony Brook универзитету. (Следећа позиција: постдок на Лоренс Беркли Лабораторији. Тренутна позиција: KIST Seoul Senior Scientist.)

3) Qianheng Du (2016-2020) је дисертацију одбранио 2020. године на Stony Brook универзитету. (Следећа позиција: постдок на ANL.)

Посебно треба истаћи да је Чедомир Петровић руководио радом већег броја постдокторских истраживача, као и гостујућих истраживача који су потом наставили са веома успешним научним каријерама.

1) Xiangde Zhu, гостујући научник 2009. (Тренутна позиција: Scientist, High Magnetic Field Laboratory (HMFL) Chinese Academy of Sciences (CAS) Hefei.

2) Hechang Lei, постдок 2009-2012. (Следећа и тренутна позиција: Професор Renmin Univ. Beijing.)

3) Kefeng Wang, гостујући научник 2010-2012, постдок 2013-2014. (Следећа позиција: Univ. of Maryland, постдок. Тренутна позиција: Rutgers Center for Emergent Materials.)

4) Lijun Li, гостујући научник 2013-2014. (Тренутна позиција: Научник, Laboratory for Nanomedicine KAUST.)

5) Yongchang Ma, гостујући научник 2013-2014. (Тренутна позиција: Професор физике, Tianjin University of Technology, Tianjin.)

6) Weijun Ren, гостујући научник 2014-2015. (Тренутна позиција: научник, Shenyang National Laboratory for Materials Science CAS, Shenyang.)

7) Aifeng Wang, постдок 2014-2018. (Следећа и тренутна позиција: Ванредени Професор физике, Chongqing Univ.)

8) Jianjun Tian, гостујући научник 2015-2016. (Тренутна позиција: Професор физике, Henan University, Kaifeng.)

9) Yu Liu, постдок 2016-2020. (Следећа и тренутна позиција: LANL Director Fellow.)

### 3.3 Нормирање броја коауторских радова, патената и техничких решења

Цела каријера: M21a: 51, M21: 179, M22: 30, M23: 11. Број бодова без нормирања: 2125 (радови) + 16 (патент) + 6 (зборници са међународних скупова) = 2147. Са нормирањем: 1883.64

Последњих 15 година: M21a: 33, M21: 167, M22: 22, M23: 11. Број бодова 1809 (радови) + 6 (зборници са међународних скупова) = 1815. Са нормирањем: 1599,62

### 3.4 Руковођење пројектима, потпројектима и пројектним задацима

1. Field Work Proposal US DOE Office of Basic Energy Sciences, "Quantum Materials for Energy Science". Primary Investigator (једини) 2018 – present. Око \$680,000/год.
2. Field Work Proposal US DOE Office of Basic Energy Sciences: "Exploratory Materials Synthesis and Characterization". Primary Investigator (једини). Стартап 2002-2005, онда настављани 2005 – 2018. Око \$650,000/год.

3. Center for Computational Design of Functional Strongly Correlated Materials” Co-PI, 2015-2019. Око \$150.000/год.
4. Energy Frontier Research Center Center for Emergent Superconductivity. Co-PI 2009- 2018. Око \$110.000/год.
5. Canadian Institute for Advanced Research Quantum Materials Program. Фондови за путовања чланова групе, 2008-2019 (око \$2-3000/год).
6. Humboldt Fellowship for Experienced Researchers 2011-2014. Око Euro 35,000 за Путовања и локалне трошкове. Око 10.000 Euro истраживачких фондова.
7. University of Tokyo Visiting Professor Program 2008. Плаћен боравак, путовање и локални трошкови.

### **3.5 Активност у научним и научно-стручним друштвима**

Рецензирање пројеката. Рецезент за многобројне пројекте Министарства енергије и Националне научне фондације САД (US DOE, US NSF), Немачке научне фондације (DFG), Европских агенција (European Research Council, European Science Foundation), Израелске научне фондације (ISF), научних издавачких кућа (World Scientific), Канадске Научне Фондације (NSERC – Canada Research Chair).

Рецензирање часописа. Рецезент за многобројне часописе као и за истраживачке предлоге за Националну Лабораторију за Висока Магнетна Поља САД (Талахаси и Лос Аламос) (NHMFL Tallahassee/LANL) и за Стенфордски Синхротрон (SSRL). Од журнала су приложени само неки из M21a категорије: Physical Review X, Physical Review Letters, Nature Materials, Nature Physics, Nature Reviews Physics, Nature Communications, npj Quantum Materials, Chemistry of Materials, Journal of The American Chemical Society, Nano Letters, Advanced Electronic Materials, Advanced Functional Materials.

Функције у друштвима, телима, комитетима:

- 1 US Department of Energy Basic Research Needs for Superconductivity 2006.
- 2 National High Magnetic Field Laboratory USA User Committee Member 2011-2014.
- 3 Brookhaven National Laboratory, Condensed Matter Physics and Materials Science Department seminar committee 2003-2004, 2016-present.
- 4 Brookhaven National Laboratory Council 2012-2014.
- 5 US Department of Energy Basic Research Needs for Synthesis Science 2016.
- 6 Brookhaven National Laboratory Energy and Photon Sciences Future Directions Working Group member 2017.

### **3.6 Утицајност научних резултата**

Утицајност научних резултата кандидата је наведена у одељку 3.1. Пун списак радова са бројем цитата је дат у прилогу.

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

У коауторским радовима Чедомир Петровић показује комплетан развој научника објављујући:

- Утицајне радове где је први аутор на нивоу студента постдипломца где је акценат на развоју метода синтезе и иновативним мерењима у пројектима где је сениор аутор његов ментор Zachary Fisk. Примери:

- a) *Heavy fermion superconductivity in CeCoIn<sub>5</sub> at 2.3 K*, C. Petrovic, P. G. Pagliuso, M.F. Hundley, R. Movshovich, J.L. Sarrao, J. D. Thompson, Z. Fisk and P. Monthoux J. Phys.: Cond. Matter Lett.13, L337 (2001). Цитиран 867 пута (827 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021.
- b) *A new heavy-fermion superconductor CeIrIn<sub>5</sub>: a relative of the cuprates?* C. Petrovic, R. Movshovich, M. Jaime, P.G. Pagliuso, M.F. Hundley, J. L. Sarrao, Z. Fisk and J.D. Thompson Europhys. Lett. 53(3), 354 (2001). Цитиран 460 пута (445 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021.
- Утицајне радове где ради у тиму аутора као постдокторски истраживач, са акцентом доприноса на развоју метода синтезе и на брзим стандардним мерењима у групи под руководством Paul Canfield-а. На пример:
 

a) *Boron isotope effect in superconducting MgB<sub>2</sub>*. S. L. Bud'ko, G. Lapertot, C. Petrovic, C. E. Cunningham, N. Anderson and P.C. Canfield, Phys. Rev. Lett. 86, 1877 (2001). Цитиран 852 пута (842 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021.

b) *Magnetoconductivity and H<sub>c2</sub>(T) in MgB<sub>2</sub>*. S. L. Bud'ko, C. Petrovic, G. Lapertot, C. E. Cunningham, P.C. Canfield, M.-H. Jung and A. Lacerda. Phys. Rev. B 63 R220503 (2001). Цитиран 127 пута (124 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021.
  - Утицајне радове као независан научник и вођа своје групе на Националној лабораторији Брукхејвен. Ти радови укључују колаборативне радове који су идејно вођени од стране Чедомира и његове групе и радове који су вођени са другим групама у сарадњи где Чедомир и његова група обављају задатак синтезе материјала за одређене експерименте. Видети списак пет најзначајнијих радова као и рецимо:
 

a) *Anisotropic violation of a Wiedemann-Franz law at a quantum critical point*. M. Tanatar, J. Paglione, C. Petrovic and L. Taillefer, Science 316, 1320 (2007). Цитиран 96 пута (87 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021.

b) *Quantum transport of two dimensional Dirac fermions in SrMnBi<sub>2</sub>*. Kefeng Wang, D. Graf, Hechang Lei, S. W. Tozer and C. Petrovic. Phys. Rev. B 84, 220401 (2011). Цитиран 95 пута (93 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021.

c) *Critical behavior of quasi-two-dimensional semiconducting ferromagnet Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>*. Yu Liu and C. Petrovic. Phys. Rev. B 96, 054406 (2017). Цитиран 95 пута (93 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021. Цитиран 54 пута (45 хетероцитата) по Web of Science 18. Јуна 2021.

### 3.8 Уводна предавања на конференцијама и друга предавања

Списак одабраних значајних предавања М32 у последњих десетак година укључује:

- Cedimir Petrovic, *Critical Behavior and Thickness-Dependent Magnetic Order in CrI<sub>3</sub>*, MRS Fall Meeting Boston 2019,
- Cedimir Petrovic, *Defect-induced colossal thermopower in FeSb<sub>2</sub>*, *The 20<sup>th</sup> Symposium on Condensed Matter Physics*, Belgrade 2019,
- Cedimir Petrovic, *Superconducting Order from Disorder in 2D Charge Density Wave Materials*, European Materials Research Society (E-MRS) Meeting, Warsaw 2018,
- Cedimir Petrovic, *Superconductivity in K<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>-ySeS<sub>z</sub>*, APS March Meeting 2012, Boston USA.

Осим ових, било је и још предавања по позиву за које апстрактни нису штампани на интернету па нису бодовани у укупном збиру бодова (квантитативна оцена) али се неки могу наћи на интернет линковима у прилогу.

#### 4. Елементи за квантитативну анализу рада

Остварени резултати у целој каријери и последњих 15 година:

##### Цела Каријера:

Категорија	М бодова по раду	Број радова	Укупно М бодова	Нормирани број М бодова
M21a	10	51	510	411,77
M21	8	179	1432	1282,99
M22	5	30	150	138,01
M23	3	11	33	28,87

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

Минимални број М бодова	Неопходно	Остварено, број М бодова без нормирања	Остварено, нормирани број М бодова
Укупно	272		
<b>M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90</b>	200	<b>2147</b>	<b>1883,64</b>
<b>M11+M12+M21+M22+M23</b>	142	<b>2125</b>	<b>1861,64</b>

##### Последњих 15 година:

Категорија	М бодова по раду	Број радова	Укупно М бодова	Нормирани број М бодова
M21a	10	33	330	260,39
M21	8	167	1336	1202,21
M22	5	22	110	102,15
M23	3	11	33	28,87

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

Минимални број М бодова	Неопходно	Остварено, број М бодова без нормирања	Остварено, нормирани број М бодова
Укупно	272		
<b>M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90</b>	200	<b>1815</b>	<b>1599,62</b>
<b>M11+M12+M21+M22+M23</b>	142	<b>1809</b>	<b>1593,62</b>

## 5. Закључак и предлог

Др Чедомир Петровић, запослен као научник у Националној лабораторији Брукхејвен, САД, је развио изузетну научну каријеру и његова група за синтезу и карактеризацију материјала на БНЛ-у је међу најпризнатијима у свету. Он је током своје каријере имао већи број радова са кључним открићима која су отворила нова поља истраживања како у области фундаменталне физике, тако и у науци о материјалима. У Чедомировој лабораторији су се едуковали бројни физичари који сада имају успешне самосталне каријере у САД, Кини и Јужној Кореји.

Из богатог научног опуса посебно можемо да издвојимо откриће суперпроводности у 115 структурама квазидвострумензионих тешких фермиона, ( $\text{CeCoIn}_5$  и други), откриће метода синтезе магнезијум диборида које је значајно унапредило како основна истраживања преко брзе индикације суперпроводног механизма, тако и индустријске примене преко брзог, једноставног и јефтеног начина прављења. Потом издвајамо откриће  $\text{FeSb}_2$  као новог Кондо изолатора и материјала са највећом термоснагом у природи, што је подстакло и велику активност у теоријском разумевању ових материјала. У новијем научног опусу се издвајају бројни радови на синтези и карактеризацији суперпроводника на бази гвожђа, откриће Диракових тополошких стања у  $\text{SrMnBi}_2$  и  $\text{CaMnBi}_2$  и њима сродним материјалима, као и открића нових двострумензионих ван дер Валс магнетних кристала.

Др Чедомир Петровић од 2009. године активно сарађује на пројектима Центра за физику чврстог стања и нове материјале, Центра изузетних вредности у оквиру Института за физику у Београду. Из ове сарадње, која и даље траје, до сада је објављено преко 20 радова у часописима највеће међународне репутације. Захваљујући свом изузетном научног прегнућу, сарадњи и доприносу развоју српског научног простора др Чедомир Петровић је 2015. године изабран за иностраног члана САНУ.

На основу података из извештаја се види да кандидат вишеструко испуњава све квантитативне и квалитативне услове за избор у звање научни саветник прописане Правилником о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Због тога нам је велико задовољство да предложимо Научном већу Института за физику у Београду да донесе одлуку о прихватању предлога за избор др Чедомира Петровића у звање научни саветник.

У Београду, 20. 7. 2021.

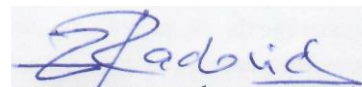
Чланови комисије



академик Зоран В. Поповић, научни саветник  
Институт за физику у Београду



др Дарко Танасковић, научни саветник  
Институт за физику у Београду



академик Зоран Радовић, редовни професор  
Физички факултет Универзитета у Београду