

Prof. dr hab. Tadeusz Domański  
Katedra Fizyki Teoretycznej  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej  
20-031 Lublin

Lublin, 7 sierpnia 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Maksymiliana Środy pt.  
**„Electronic and magnetic properties of low-dimensional  
strongly correlated multiorbital systems”**

Przedłożona rozprawa doktorska ma charakter teoretyczny i porusza tematykę zjawisk realizowalnych w kwazjednowymiarowych układach silnie skorelowanych elektronów, ze szczególnym zwróceniem uwagi na rolę orbitalnych stopni swobody. Przeprowadzone badania uwzględniają m.in. orbitalnie selektywną fazę Motta związków na bazie żelaza, egzotyczne warianty magnetyzmu drabinek kwantowych, topologicznie nietrywialne nadprzewodnictwo zaindukowane korelacjami w jednowymiarowych łańcuchach atomowych, fazę Haldane’a w modelu dwuorbitalnym i powstawanie pasm Hunda w układach wielo-orbitalnych. Właściwości silnie skorelowanych układów elektronowych wyznaczono przy użyciu metody macierzy gęstości grupy renormalizacyjnej (DMRG). Duży stopień oryginalności uzyskanych wyników może mieć istotne znaczenie dla środowiska naukowego.

Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem dra hab. Jacka Herbrycha w Zakładzie Układów Silnie Skorelowanych w Instytucie Fizyki Teoretycznej na Politechnice Wrocławskiej. Na zasadniczą treść rozprawy składa się cykl spójnych tematycznie artykułów opublikowanych w *Phys. Rev. B* **104**, 045128 (2021); *Nature Commun.* **12**, 2955 (2021); *Phys. Rev. B* **108**, L081102 (2023) [arXiv:2210.11209] oraz manuskryptu dostępnego w bazie preprintów arXiv:2304.11154 (2023). Do cyklu wymienionych prac naukowych Doktorant dołączył zwięzły przewodnik, w którym zarysował motywację badań, przedstawił zasadnicze aspekty analizowanych zagadnień w układach wielo-orbitalnych oraz opisał schemat stosowanej metody obliczeniowej. Poniżej przedstawię przegląd wyników uzyskanych przez Doktoranta, ze zwróceniem uwagi na ich wartość merytoryczną.

W rozdziale pierwszym Doktorant nawiązał do koncepcji emergentności układów wieloatomowych sformułowanej przez P.W. Andersona. Wymienił przykłady zjawisk emergentnych realizowanych w układach silnie skorelowanych elektronów, m.in. nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe tlenków miedzi oraz nadprzewodnictwo związków na bazie

żelaza. Efekty korelacyjne odgrywają tam zasadniczą rolę, zaś ich opis jest trudnym zadaniem gdyż tradycyjne techniki rachunku zaburzeniowego są nieadekwatne, natomiast metody numeryczne (ściślej diagonalizacji lub kwantowych symulacji Monte Carlo) są ograniczone do układów o małych rozmiarach. Przedstawiając strukturę krystaliczną i konfigurację elektronową nadprzewodników wysokotemperaturowych Doktorant podkreślił, że realistyczny opis wymaga uwzględnienia orbitali  $3d$  atomów miedzi oraz  $2p$  atomów tlenu. Pomimo dwupasmowego charakteru często stosowany jest efektywny jednopasmowy scenariusz opisany modelem Hubbarda (z ewentualnymi rozszerzeniami), gdzie potencjał odpychania kulombowskiego jest porównywalny z energią kinetyczną elektronów. Taki przypadek stanowi bardzo poważne wyzwanie dla teoretyków. Struktura elektronowa i krystaliczna nadprzewodników żelazowych (pniktydków oraz chalcogenidków) w dużej mierze przypomina właściwości nadprzewodzących tlenków miedzi, ale wieloorbitalny charakter jest w nich niezbędny do uwzględnienia. Przedmiotem badań przeprowadzonych przez Doktoranta były warianty takich żelazowych związków o silnie zredukowanej wymiarowości. W rozprawie doktorskiej zbadano struktury drabinkowe, gdzie pod wpływem ciśnienia występuje nadprzewodnictwo oraz bogactwo różnych form uporządkowania magnetycznego w orbitalnie selektywnej fazie Motta. Doktorant zajmował się też strukturami łańcuchowymi, w obu przypadkach stosując technikę DMRG do analizy efektów orbitalnych i korelacyjnych.

W kolejnym rozdziale skoncentrowano się na opisie właściwości litych nadprzewodników na bazie żelaza oraz kwaziejednowymiarowych drabinek i łańcuchów tych związków. Doktorant podał zarówno analogie właściwości pniktydków oraz chalcogenidków z tlenkami miedzi (m.in. sąsiedztwo fazy nadprzewodzącej z fazą antyferromagnetyczną i niefononowy mechanizm parowania elektronów) jak też istotne różnice między nimi, np. odmienny charakter uporządkowania antyferromagnetycznego, inną symetrię parametrów porządku i kluczowe znaczenie wieloorbitalności w związkach na bazie żelaza. Szczególną uwagę poświęcono roli ciśnienia jako czynnika indukującego stan nadprzewodzący. W strukturach drabinkowych zjawisko takie odkryto pod ciśnieniem kilkunastu GPa w 2015 roku w  $\text{BaFe}_2\text{S}_3$  a następnie również w  $\text{BaFe}_2\text{Se}_3$ . Niskowymiarowe układy skorelowanych elektronów uwydatniają silny wpływ fluktuacji kwantowych na frustrację i przestrzenną teksturę uporządkowania. Doktorant wraz z Promotorem postanowili więc przeprowadzić wnikliwą analizę możliwych do pojawienia się faz związków na bazie atomów żelaza w strukturach krystalicznych typu drabinek i łańcuchów. Omawiając konfigurację elektronową prototypowego związku  $\text{BaFe}_2\text{S}_3$ , Doktorant wskazał konieczność uwzględnienia wieloorbitalnego charakteru (potwierzonego w obliczeniach *ab initio*) oraz istotną rolę pola krystalicznego (odpowiedzialnego za rozszczepienie orbitali  $3d$  atomów żelaza, które zilustrowano na rysunku 2.6). W obecnym kontekście, reguły wyboru Hunda determinują specyficzny rodzaj faz zaindukowanych korelacjami elektronowymi.

W dalszej części rozdziału drugiego Doktorant przedstawił mikroskopowy model adekwatny do opisu drabinkowych i łańcuchowych struktur związków 123 na bazie żelaza. Realistyczny opis wymagałby uwzględnienia pięciu orbitali  $3d$ , na których rozlokowanych jest 6 elektronów. Stopień trudności w analizie takiego scenariusza wymaga jednak podejścia alternatywnego, redukując analizę do efektywnego scenariusza 3-orbitalnego. Empirycznym poparciem stosowalności takiego podejścia są wyniki fotoemisji, wskazujące na dominujący udział orbitali  $d_{xz}$ ,  $d_{yz}$ ,  $d_{xy}$  w otoczeniu poziomu Fermiego. Wpływ efektów korelacyjnych w ramach modelu trójorbitalnego można opisać przez hamiltonian Hubbarda-Kanamoriego. Elementy składowe tego scenariusza (pokazane graficznie na rysunku 2.7) obejmują wyraz kinetyczny (tzn. przeskok elektronów między węzłami sieci krystalicznej), odpychanie kulombowskie w obrębie orbitali i pomiędzy orbitalami, oddziaływanie wymienne typu Hunda oraz przeskok par elektronowych między orbitalami. Diagram fazowy tego modelu można badać w funkcji koncentracji elektronów (co odpowiada domieszkowaniu) oraz względem potencjału oddziaływań odpychających na węzle (co uwzględnia rolę ciśnienia). Możliwość pojawienia się niskowymiarowych faz kwantowych zbadano przy użyciu obliczeń numerycznych, stosując technikę DMRG. Nieperturbacyjny charakter takiego podejścia pozwolił określić przestrzenne rodzaje uporządkowania w układach kwazijednowymiarowych złożonych nawet z ponad stu węzłów sieci. Dalszy fragment rozdziału drugiego dyskutuje teoretyczne i doświadczalne przesłanki orbitalnej selektywności. Istota tego zjawiska polega na tym, że pomimo identycznych oddziaływań w poszczególnych orbitalach  $3d$  sprzężenie Hunda może powodować orbitalnie selektywną renormalizację pasm i masy efektywnej, prowadząc w rezultacie do zaindukowania fazy Motta (OSMP) w jednym z pasm, podczas gdy pozostałe są w stanie metalicznym. Doktorant określił warunki realizowalności takiego efektu, odnosząc się do obliczeń opartych na przybliżeniu dynamicznego pola średniego i konfrontując wyniki z danymi doświadczalnymi. Dla ułatwienia obliczeń DMRG przedstawiono również minimalistyczny scenariusz OSMP opisany za pomocą dwupasmowego modelu typu Kondo-Heisenberga wyprowadzonego przy pomocy transformacji Schrieffera-Wolffa.

Zestaw oryginalnych wyników uzyskanych przez Doktoranta jest opisany w czterech artykułach, które stanowią treść rozdziałów 3-6 przedłożonej rozprawy doktorskiej. Zasadnicze aspekty dyskutowanych zjawisk fizycznych opatrzone zostały wprowadzeniem i podsumowaniem. Poniżej wymienię ważniejsze osiągnięcia uzyskane w tych publikacjach.

### [ Rozdział 3 ]

*Quantum magnetism of iron-based ladders: blocks, spirals, and spin flux,*  
M. Środa, E. Dagotto, J. Herbrych, Phys. Rev. B **104**, 045128 (2021).

W ramach dwu-orbitalnego modelu Hubbarda-Kanamoriego oraz jego efektywnej jedno-orbitalnej wersji opisaną Hamiltonianem Kondo-Heisenberga zbadano różne typy uporządkowania magnetycznego drabinek kwantowych. Obliczenia przeprowadzono dla układów

złożonych z 72 węzłów. Charakterystykę stanu podstawowego (dla zerowej temperatury) wyznaczono za pomocą programu numerycznego DMRG++ opracowanego w Oak Ridge National Lab i korzystając z jego dalszych uaktualnień. Do konkretnych obliczeń brano pod uwagę 1200 najniżej leżących stanów energetycznych, uzyskując poziom dokładności rzędu  $10^{-6}$  po dwudziestu do trzydziestu iteracjach. Różne warianty uporządkowania magnetycznego skorelowanych drabinek kwantowych zilustrowano na panelach *d-i* rysunku 1. Reprezentatywny diagram fazowy w funkcji domieszkowania ( $n_K$ ) i potencjału odpychania kulombowskiego na węzle ( $U$ ) jest przedstawiony na rysunku 4. Szczegółowa dyskusja wyników numerycznych (rozdział III artykułu) bazuje na analizie spinowego czynnika strukturalnego, przestrzennych korelacji spinowych (wzdłuż i prostopadle do drabinek) oraz chiralnej funkcji korelacyjnej  $\mathbf{S}_{\mathbf{r}_i} \times \mathbf{S}_{\mathbf{r}_j}$ . Dla przypadku granicy jednopasmowej (gdy pasmo antywiążące jest całkowicie wypełnione) wykazano blokowy lub blokowo-spiralny typ porządku magnetycznego, odpowiednio przy średniej i dużej wartości potencjału oddziaływań kulombowskich. Natomiast w granicy dwupasmowej stwierdzono realizację niewspółmiernej (*incommensurate*) antyferromagnetyzmu oraz separacji faz (w zakresie niskiej koncentracji) a także przewidziano chiralny typ magnetycznego uporządkowania w postaci wirów spinowych na oczkach drabinki kwantowej (w zakresie pośrednich wartości koncentracji  $n_K$ ). Tak bogaty zestaw uporządkowań magnetycznych uzyskany dla drabinkowych struktur związków żelaza  $\text{AFe}_2\text{X}_3$  nie ma odpowiednika w strukturach łańcuchowych. Autorzy podkreślili natomiast pewne podobieństwo do faz uporządkowania wstęgowego zaobserwowanych doświadczalnie w tlenkach miedzi.

#### [ Rozdział 4 ]

*Interaction-induced topological phase transition and Majorana edge states in low-dimensional orbital-selective Mott insulators*

J. Herbrych, M. Środa, G. Alvarez, M. Mierzejewski, E. Dagotto,  
Nature Commun. **12**, 2955 (2021).

W tej bardzo ciekawej pracy wykazano możliwość uzyskania topologicznej fazy nadprzewodzącej zaindukowanej korelacjami elektronowymi w strukturze łańcuchowej związków na bazie żelaza. Inspiracją koncepcji były wcześniejsze badania przeprowadzone przez Promotora (dla łańcuchów) a także Doktoranta (dla drabinek), przewidujące spiralne uporządkowanie magnetyczne orbitalnie selektywnej fazy Motta. Helikalny magnetyzm w połączeniu z nadprzewodnictwem kwazijednowymiarowych układów elektronowych są składnikami niezbędnymi/wystarczającymi do pojawienia się topologicznie nietrywialnej fazy z egzotycznymi kwazicząstkami Majorany. Autorzy rozpatrzyli współzależność spiralnego magnetyzmu z parowaniem elektronowym, które może pochodzić z efektu bliskości dla łańcucha w kontakcie z konwencjonalnym nadprzewodnikiem albo pod wpływem działania ciśnienia lub domieszkowania. Rolę oddziaływań uwzględniono w ramach modelu Kondo-Heisenberga i w obecności parowania analizowano techniką DMRG.

Sprężenie zwrotne korelacji (odpowiedzialnych za teksturę magnetyczną) na parowanie elektronowe traktowano natomiast za pomocą diagonalizacji Bogoliubova de Gennesa. Do uzbieżnienia wyników wystarczyło w praktyce 5 iteracji. Analizując elektronową funkcję spektralną dla zmiennych wartości potencjału odpychania kulombowskiego  $U$ , wykazano pojawienie się kwazicząstek zerowej energii (na poziomie Fermiego) zlokalizowanych w pobliżu brzegów łańcucha (rysunek 3c) w zakresie  $U > U_c \simeq 1,5W$  [gdzie  $W$  oznacza szerokość pasma]. Wynik ten sugeruje pojawienie się topologicznego nadprzewodnictwa. W celu jednoznacznej identyfikacji fazy topologicznej przeprowadzono kilka dodatkowych analiz. Wykazano, że: a) cząstkowe i dziurowe komponenty brzegowych kwazicząstek są niemal identyczne, b) wycalkowana waga spektralna tych modów jest bliska połowie (wynosi  $\sim 0,47$ ) świadcząc o ich frakcjonalności, c) zachodzi przestrzenna współzależność elektronowej i dziurowej funkcji spektralnej kwazicząstek z przeciwnych brzegów łańcucha, d) w pobliżu wartości krytycznej  $U \approx U_c$  występuje gwałtowny wzrost entropii splątania von Neumanna. Ten ostatni efekt jest dowodem topologicznego przejścia fazowego. Wykazano również, że w zakresie oddziaływań powyżej  $U_c$  w łańcuchu pojawia się trypletowe parowanie elektronów, którego przestrzenny profil ma oscylacyjny charakter (rysunek 6c). Przedstawiony tutaj wariant indukowania topologicznej fazy nadprzewodzącej jakościowo różni się od dwóch scenariuszy rozpatrywanych w literaturze specjalistycznej dla nanodrutów półprzewodnikowych z silnym sprzężeniem Rashby oraz łańcuchów samoorganizujących się atomów magnetycznych, w których parowanie trypletowe jest obecne zarówno poniżej jak też powyżej przejścia topologicznego. Ciekawy jestem czy Doktorant mógłby podać fizyczne argumenty uzasadniające nieobecność parowania trypletowego w zakresie oddziaływań kulombowskich zbliżających się od dołu do wartości krytycznej  $U_c$ .

## [ Rozdział 5 ]

*Transition to the Haldane phase driven by electron-electron correlations,*  
A. Jażdżewska, M. Mierzejewski, M. Środa, A. Nocera, G. Alvarez,  
E. Dagotto, J. Herbrych, arXiv:2304.11154 (2023).

W ramach dwuorbitalnego modelu Hubbarda-Kanamoriego w granicy półzapełnienia zbadano przejście topologiczne do fazy Haldane’a zaindukowane korelacjami elektronowymi. Dla jednowymiarowego łańcucha o rozmiarach od dziesięciu do stu czterdziestu węzłów przeprowadzono w tym celu obliczenia DMRG. Wychodząc z dwuorbitalnego układu fermionowego wykazano występowanie fazy topologicznej, oryginalnie przewidzianej przez Haldane’a dla łańcuchów spinowych o wartości całkowitej. W obecnym podejściu efektywny spin całkowity jest rezultatem współgrania odpychania kulombowskiego na węzle ( $U$ ) i oddziaływania wymiennego typu Hunda ( $J_H$ ). Widmo wzbudzeń magnetycznych zbadano w funkcji  $U$  oraz  $J_H$  na podstawie dynamicznego czynnika strukturalnego. Ze wzrostem odpychania kulombowskiego stwierdzono jakościową zmianę charakteru wzbudzeń magnonowych, od dyspersji typowej dla spinów połówkowych do dyspersji spinów

całkowitych, przy jednoczesnym zaniku fluktuacji ładunkowych (rysunek 1). Stwierdzono, że pojawienie się przerwy w widmie magnonów ma miejsce powyżej krytycznej wartości oddziaływania  $U_c$  [zależnej od  $J_H$ ] zanim jeszcze wykształca się efektywny spin całkowity. Analiza statycznej funkcji korelacji spinowych wskazała na obecność modów brzegowych w zakresie powyżej  $U_c$  o eksponencjalnym profilu wzajemnego skorelowania przestrzennego. Wyraźnej przesłanki na rzecz przejścia topologicznego i obecności frakcyjnych modów brzegowych powyżej  $U_c$  dostarczyła ewolucja widma splątania (rysunek 4). Dowodem topologicznego charakteru fazy Haldane’a w obecnym fermionowym scenariuszu było też pojawienie się nielokalnego uporządkowania typu *string order* powyżej krytycznego oddziaływania (rysunek 5), które świadczy o złamaniu dyskretnej symetrii  $Z_2 \times Z_2$ .

## [ Rozdział 6 ]

*Hund bands in spectra of multiorbital systems,*  
M. Środa, J. Mravlje, G. Alvarez, E. Dagotto, J. Herbrych,  
Phys. Rev. B **108**, L081102 (2023) [arXiv:2304.11154].

Na podstawie obliczeń DMRG i dynamicznego pola średniego przeprowadzonych dla dwu- i trójorbitalnego modelu Hubbarda-Kanamoriego przeanalizowano widma wzbudzeń skorelowanych elektronów, wykazując pojawienie się dodatkowej struktury pomiędzy dolnym i górnym pasmem Hubbarda zaindukowanej oddziaływaniem wymiennym Hunda. Przykładową dyspersję takiej gałęzi wzbudzeń (nazwanej pasmem Hunda) uzyskaną w ramach scenariusza dwuorbitalnego dla łańcucha 48 węzłów przedstawiono na rysunku 1. W zakresie pośrednich oddziaływań kulombowskich ( $U \sim W$ ) lokalna gęstość stanów składa się z pasm Hubbarda oraz dodatkowej gałęzi między nimi, której energia zależy od oddziaływania wymiennego  $J_H$ . Pasma Hunda jest tym bardziej dostrzegalne, im większa jest wartość potencjału  $U$ . Aby zrozumieć mechanizm powstawania pasma Hunda rozpatrzono wzbudzenia jednocząstkowe efektywnego modelu Kondo-Heisenberga w granicy atomowej ( $U, J_H \rightarrow \infty$ ) i porównano je z wynikami numerycznymi. Zidentyfikowano w ten sposób warunki niezbędne do pojawienia się gałęzi Hunda, podkreślając kluczowe znaczenie obecności wyższych multipletów realizowalnych w układach wieloorbitalnych. Wskazano również bardzo ważną rolę fluktuacji ładunkowych na podstawie obliczeń DMRG dla trójorbitalnego modelu o różnych koncentracjach elektronowych (rysunek 3). Autorzy stwierdzili ponadto, że występowanie pasm Hunda nie musi towarzyszyć orbitalnie selektywnej fazie Motta i nie jest cechą wyłącznie układów o zredukowanej wymiarowości. Możliwy sposób empirycznej detekcji pasm Hunda zilustrowano na przykładzie przewodnictwa zmiennoprądowego (rysunek 4) wyznaczonego przy pomocy dynamicznego pola średniego dla reprezentatywnych wartości oddziaływania  $J_H$  w modelu trójorbitalnym. W obecnej pracy mam pewną niejasność dotyczącą funkcji spektralnej zdefiniowanej wzorem (S1) w materiale suplementarnym. Zastanawia mnie dlaczego propagatory cząstkowy i dziurowy są określone w transformacji Fouriera względem węzła centralnego ( $c =$

$L/2$ ). Ponadto, lokalna gęstość stanów zapisana pod wzorem (2) na drugiej stronie prawej kolumny publikacji powinna formalnie być zależną nie tylko od indeksu  $\gamma$  (znakującego orbital) ale też od położenia (tzn. numeru węzła). Ten drugi argument można byłoby pominąć, gdyby układ był translacyjnie niezmienniczy. Wydaje mi się, że w obecnym przypadku tak jednak nie jest. Chciałbym więc prosić Doktoranta o wyjaśnienie obu tych kwestii (natury technicznej) podczas finalnej obrony doktoratu.

Ostatnie dwa fragmenty rozprawy doktorskiej zwięźle podsumowują najważniejsze wyniki przeprowadzonych badań (rozdział 7) oraz opisują schemat obliczeniowy metody DMRG (dodatek A). Doktorant rozważył potencjalne uogólnienie otrzymanych wniosków na silnie skorelowane układy o wyższej wymiarowości. Między innymi wskazał ewentualną realizację zerowych modów Majorany w stanach związanych na rdzeniach wirowych fazy mieszanej (pomiędzy  $H_{c1}$  i  $H_{c2}$ ) nadprzewodzących związków  $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ . Ta kwestia wydaje się jednak dość kontrowersyjną, gdyż spektroskopia skanningowa dla żelazowego nadprzewodnika o domieszkowaniu  $x = 0,45$  sugerująca obecność modu Majorany w rdzeniach wirowych [D. Wang *et al*, *Science* **362**, 333 (2018)] została przez inną grupę zidentyfikowana jako jeden z trywialnych stanów związanych typu Caroli-de Gennesa-Matricona [M. Chen *et al*, *Nature Commun.* **9**, 970 (2018)]. O wiele bardziej obiecującą wydaje się natomiast realizacja pasm Hunda w układach wielorbitalnych o dowolnej wymiarowości, na co wskazują wyniki uzyskane przy pomocy dynamicznego pola średniego (będącego ścisłą metodą w granicy  $\text{dim}=\infty$ ). Kolejną perspektywą jest możliwość wykorzystania zastosowanych w obecnej pracy zaawansowanych metod obliczeniowych do konkretnych warunków doświadczalnych, uwzględniając realne parametry mikroskopowych hamiltonianów oszacowanych na podstawie obliczeń *ab initio*. Procedurę DMRG można również uogólnić na przypadek stanów nierównowagowych, analizując czasowo-zależne właściwości niskowymiarowych układów skorelowanych.

Podsumowując, mgr inż. Maksymilian Środa przeprowadził szereg cennych obliczeń, badając rolę korelacji elektronowych w wielorbitalnych strukturach kwazijednowymiarowych o geometrii łańcuchowej i drabinkowej. Za ważne osiągnięcie uznałbym umiejętność posługiwania się wyrafinowaną metodą obliczeniową macierzy gęstości grupy renormalizacyjnej (DMRG), do której Doktorant dołączył własny program na bazie biblioteki ITensor. Zasadniczą część obliczeń numerycznych przeprowadzono we Wrocławskim Centrum Superkomputerowym. Zgodnie z deklaracją (opisaną na stronie *vii* rozprawy) Doktorant wniósł zasadniczy wkład w powstanie publikacji [O1-O4], składających się na treść rozdziałów 3-6. Na podkreślenie zasługuje również aktywna kooperacja Doktoranta z tak znakomitymi ekspertami fizyki układów silnie skorelowanych, jak: Elbio Dagotto (Oak Ridge, USA), Peter Prelovšek i Jernej Mravlje (Lublana, Słowenia) oraz Marcin Mierzejewski (Wrocław, Polska). Doktorant był beneficjentem programu wymiany akademickiej

NAWA (nr PPN/2018/1/00035) oraz uczestniczył w realizacji zadań badawczych grantu NCN kierowanego przez Promotora swojej pracy doktorskiej (nr 2019/35/B/ST3/01207).

Rozprawa doktorska magistra inżyniera Maksymiliana Środy wnosi istotny wkład w zrozumienie unikalnych właściwości zaindukowanych korelacjami w niskowymiarowych wieloorbitalnych układach elektronowych. Doktorant przeprowadził skrupulatną analizę teoretyczną, przewidując występowanie różnorodnych form magnetyzmu drabinek kwantowych (m.in. uporządkowania blokowego, spiralnego oraz wirowego), topologiczną fazę nadprzewodzącą drutu kwantowego umieszczonego w kontakcie z litym nadprzewodnikiem, realizację fazy Haldane'a w fermionowych układach multiorbitalnych oraz występowanie podpasm Hunda zaindukowanych oddziaływaniami wymiennymi. Przedłożona rozprawa została przygotowana bardzo starannie w języku angielskim i spełnia wszystkie zwyczajowe oraz prawne wymagania określone w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami) do nadania stopnia doktora w dyscyplinie *nauki fizyczne*. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie magistra inżyniera Maksymiliana Środy do publicznej obrony oraz dalszych etapów Jego przewodu doktorskiego. Jednocześnie, biorąc pod uwagę stopień zaawansowania stosownej przez Doktoranta techniki DMRG oraz wysoki poziom oryginalności wyników opublikowanych w prestiżowych czasopismach naukowych, wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej.