



Poznań, 28 lipca 2022 roku

prof. dr hab. Ireneusz Weymann  
Zakład Fizyki Mezoskopowej  
Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

## Recenzja

**w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego  
w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne  
Panu dr. Jackowi Herbrychowi**

Pan dr Jacek Herbrych jest adiunktem na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Stopień naukowy doktora nauk fizycznych otrzymał w 2013 roku na Wydziale Matematyki i Fizyki Uniwersytetu w Ljubljanie, przedkładając pracę doktorską pt. „*Finite-temperature dynamics of quantum spin chains*” przygotowaną pod opieką prof. Petera Prelovseka. Natomiast studia magisterskie z fizyki Habilitant ukończył pod opieką prof. Cezarego Gonera na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego. Dotychczasowy przebieg kariery naukowej Habilitanta jest wręcz wzorowy. Po uzyskaniu tytułu zawodowego magistra fizyki, dr Herbrych wyjechał na studia doktorskie na Uniwersytet w Ljubljanie. Następnie, odbył staż podoktorski na Uniwersytecie Kreteńskim w grupie prof. Xenophona Zotosa. Kolejne trzy lata Kandydat spędził w grupie prof. Elbio Dagotto na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Tennessee oraz w Oak Ridge National Laboratory w Stanach Zjednoczonych. W 2019 roku powrócił do Polski na Politechnikę Wrocławską w ramach projektu Polskie Powroty finansowanym przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej. Dotychczasowe zainteresowania badawcze Kandydata obejmują teoretyczne aspekty fizyki ciała stałego, ze szczególnym uwzględnieniem silnych korelacji elektronowych w układach niskowymiarowych. Habilitant specjalizuje się w badaniu wieloorbitalowych modeli Hubbarda przy pomocy nowoczesnych metod numerycznych. W obszarze zainteresowań dra Herbrycha znajdują się takie zagadnienia jak, między innymi, magnetyzm kwantowy, zjawiska wielociałowej lokalizacji, transport kwantowy, dynamika i termalizacja czy też topologiczne stany materii. Tego typu zagadnienia są obecnie przedmiotem intensywnych badań w wiodących ośrodkach naukowych na świecie. Badania prowadzone przez Habilitanta są zatem ważne i mają istotne znaczenie dla rozwoju fizyki układów niskowymiarowych, w których korelacje elektronowe odgrywają istotną rolę.

### Osiągnięcie habilitacyjne

Jako osiągnięcie naukowe będące podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego Kandydat przedstawił cykl sześciu publikacji zatytułowany „Właściwości orbitalno-selektywnej fazy Mota w niskowymiarowych systemach wielopasmowych”. Wszystkie prace cyklu ukazały się w wiodących czasopismach branżowych o zasięgu międzynarodowym i zostały opublikowane w latach 2019-2021. W

szczegółności, dwie prace zostały opublikowane w *Nature Communications*, jedna ukazała się w *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, jedna w *Physical Review Letters* oraz dwie prace opublikowano w *Physical Review B*. Jak wynika ze szczegółowego opisu wkładu Habilitanta w powstanie powyższych artykułów oraz z oświadczeń współautorów, we wszystkich pracach cyklu habilitacyjnego dr Herbrych odegrał zdecydowanie wiodącą rolę – to on inicjował projekt, wykonywał obliczenia i przygotowywał wyniki do publikacji. Habilitant w pięciu pracach jest pierwszym autorem, natomiast w ostatniej pracy cyklu habilitacyjnego jest ostatnim autorem, przy czym obliczenia w tej pracy zostały wykonane przez doktoranta pod opieką dra Herbrycha.

Cykl habilitacyjny przedstawia wyniki teoretycznych badań dotyczących własności magnetycznych, topologicznych i transportowych niskowymiarowych układów wielopasmowych ze szczególnym uwzględnieniem orbitalno-selektywnej fazy Motta. Faza ta jest unikalną własnością silnie skorelowanych układów z wielopasmową powierzchnią Fermiego, takich jak nadprzewodniki wysokotemperaturowe na bazie żelaza. W ramach cyklu rozważano jednowymiarowe oraz quasi-jednowymiarowe (drabiny) wieloorbitalowe modele Hubbarda, dla których wyznaczono odpowiednie funkcje korelacji, jak np.: dynamiczny współczynnik struktury spinowej czy też lokalną gęstość stanów. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem metody grupy renormalizacji macierzy gęstości (density matrix renormalization group – DMRG), która pozwala na uzyskanie bardzo dokładnych, ilościowych rezultatów przy jednoczesnym nieperturbacyjnym uwzględnieniu wszystkich oddziaływań. Metoda ta jest obecnie uznawana za jedną z najbardziej dokładnych metod stosowanych do badania silnie skorelowanych układów i idealnie nadaje się do badania własności układów jednowymiarowych. Wyniki uzyskane przy pomocy DMRG z jednej strony dają się bezpośrednio porównać z wynikami eksperymentalnymi, a z drugiej strony stymulują nowe prace doświadczalne. To sprawia, że rezultaty i przewidywania zawarte w cyklu habilitacyjnym mają dużą wartość naukową i przyczyniają się do dalszego rozwoju fizyki układów niskowymiarowych. Poniżej, w zwięzły sposób opiszę najważniejsze wyniki publikacji wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego.

W pierwszej pracy cyklu [H1] zbadano dynamikę spinową trójorbitalnego jednowymiarowego modelu Hubbarda oraz dwuorbitalnego drabinowego modelu Hubbarda, wyznaczając dynamiczny współczynnik struktury spinowej w blokowej orbitalno-selektywnej fazie Motta w zależności od energii i pędu. Stwierdzono występowanie dwóch różnych typów modów związanych ze wzbudzeniami spinowymi: niskoenergetycznych wzbudzeń dyspersyjnych oraz wysokoenergetycznych wzbudzeń bez dyspersji. Tego typu mody zostały wcześniej zaobserwowane doświadczalnie przy pomocy nieelastycznego rozpraszania neutronów na związkach żelazowych. W pracy wykazano, że podczas gdy wzbudzenia akustyczne są związane z porządkiem magnetycznym (ze wzbudzeniami magnonowymi pomiędzy ferromagnetycznymi blokami) i mogą zostać opisane modelem  $J_1$ - $J_2$  Heisenberga, wzbudzenia optyczne są związane z między-orbitalnymi fluktuacjami spinowymi na węzłach sieci, zależnymi od oddziaływań wymiennych Hunda.

Druga praca cyklu [H2] prezentuje wyniki badań dotyczących tworzenia się blokowych faz magnetycznych w jednowymiarowych i quasi-jednowymiarowych łańcuchach opisanych rozszerzonym modelem Hubbarda. W pracy zaproponowano również efektywny model typu Kondo-Heisenberga, który wykazuje dobrą zgodność z

pełnym modelem Hubbarda dla odpowiedniego zakresu parametrów. Wyznaczono czynnik struktury spinowej w zależności od obsadzenia orbitali, a także magnetyczny diagram fazowy układu. Przewidziano istnienie całej gamy różnych uporządkowań magnetycznych w zależności od zapełnienia orbitali oraz siły korelacji elektronowych (parametru Hubbarda  $U$ ). Ponadto, przeprowadzono także analizę dla modelu drabiny opisanej dwuorbitalowym modelem Hubbarda, która wykazała tworzenie się nowej fazy antyferromagnetycznej w zależności od obsadzenia oraz stabilizację ferromagnetycznych wysp zawierających trzy spiny.

Kolejna publikacja cyklu [H3] omawia nowe spiralne uporządkowanie magnetyczne pomiędzy klastrami spinowymi w jednowymiarowym dwuorbitalowym modelu Hubbarda. Przewidywania te są o tyle interesujące, że zwykle tego typu stany są związane z frustracją bądź oddziaływaniami łamiącymi symetrię, jak np. oddziaływanie Dzyaloshinskii-Moriya, natomiast w układzie analizowanym w pracy [H3] stan spiralny jest efektem współoddziaływania pomiędzy oddziaływaniami wymiennymi a korelacjami kulombowskimi. Ponadto, analizując zachowanie funkcji spektralnej przy przejściu do fazy blokowo spiralnej wraz ze zwiększaniem wartości oddziaływania Hubbarda  $U$  wykazano, że stan spiralny charakteryzuje się ciekawymi własnościami elektronowymi. W pobliżu poziomu Fermiego tworzą się dwa pasma, odpowiadające kwazicząstkcom obracającym się w lewo i kwazicząstkcom obracającym się w prawo, które łamią symetrię parzystości, podobnie jak w jednowymiarowych modelach z oddziaływaniem spinowo-orbitalnym. Tego typu układy są szczególnie interesujące, jeżeli chodzi o realizację topologicznie chronionych stanów brzegowych – zeroenergetycznych modów Majorany (badanych z kolei w artykule [H5]).

Czwarta praca [H4] zawiera kompleksową analizę zależności dynamicznego współczynnika struktury spinowej oraz lokalnej gęstości stanów od stopnia zapełnienia pasm, siły korelacji elektronowych  $U$  oraz od oddziaływań wymiennych Hunda. W publikacji stwierdzono występowanie wzbudzeń spinowych obejmujących wielospinowe bloki (wyspy) o wektorach falowych  $\pi/l$ , gdzie  $l$  oznacza liczbę spinów bloku. Pokazano, że istnieją dyspersyje mody akustyczne oraz bezdyspersyjne mody optyczne, które wykazują charakterystyczną zależność od parametrów układu. Ponadto, w pracy zaproponowano także fenomenologiczne modele spinowe do opisu blokowych stanów spinowych układów w orbitalno-selektywnej fazie Motta.

Piąta publikacja cyklu habilitacyjnego [H5] prezentuje wyniki dotyczące tworzenia się stanów brzegowych Majorany na końcach jednowymiarowego łańcucha, w którym występują stany spiralne. Jak zostało teoretycznie zaproponowane przez Kitaeva, mody Majorany pojawiają się w fazie topologicznej modelu ciasnego wiązania z parowaniem trypletowym. Doświadczalnie, taki łańcuch Kitaeva można zrealizować umieszczając jednowymiarowy drut z silnym oddziaływaniem spinowo-orbitalnym na podłożu nadprzewodzącym oraz w polu magnetycznym, w funkcji którego występuje topologiczne przejście fazowe. W pracy [H5] rolę oddziaływania spin-orbita odgrywa porządek spiralny, który tworzy się w orbitalno-selektywnej fazie Motta badanych układów. W szczególności, rozważono łańcuch opisany hamiltonianem Kondo-Heisenberga umieszczony na nadprzewodniku typu BCS. Najpierw wykazano, że układ taki wykazuje topologiczne przejście fazowe wraz ze wzrostem parametru Hubbarda  $U$ . Następnie, wyznaczając między innymi lokalną gęstość stanów, pokazano, że w fazie topologicznej powstają zlokalizowane stany Majorany na brzegach łańcucha. Ponadto, w pracy zademonstrowano, że w fazie topologicznej tworzy się skończona wartość trypletowego

parametru porządku, podczas gdy w fazie trywialnej dominuje tylko parowanie singletowe, wynikające z efektu bliskości nadprzewodnika. Moim zdaniem jest to jedna z najciekawszych prac cyklu, przewidująca istnienie topologicznie chronionych stanów brzegowych, które tworzą się wskutek współzawodnictwa różnych konkurujących ze sobą skal energii, obecnych naturalnie w wielopasmowych jednowymiarowych modelach Hubbarda, oraz efektu bliskości nadprzewodnika. Stany Majorany są obecnie intensywnie eksplorowane, zarówno teoretycznie jak i doświadczalnie, co jest związane z możliwościami aplikacyjnymi dla topologicznych obliczeń kwantowych.

Ostatnia praca cyklu [H6] dotyczy badania własności magnetycznych wielopasmowej drabiny Hubbarda w orbitalno-selektywnej fazie Motta, opisanej efektywnym modelem Kondo-Heisenberga. W pracy wyznaczono kompletny diagram fazowy w zależności od liczby obsadzeń oraz siły oddziaływania Hubbarda. W ogólności zaobserwowano istnienie stanów spinowych analogicznych jak dla jednowymiarowego łańcucha. Potwierdzono istnienie blokowego antyferromagnetycznego uporządkowania pomiędzy ferromagnetycznymi blokami spinowymi o rozmiarach  $2 \times 2$ . Wykazano również istnienie blokowego magnetyzmu pomiędzy blokami o większych rozmiarach, zależnych od domieszkowania, a także istnienie blokowych stanów spiralnych. Ponadto, w pracy przewidziano istnienie szeregu nowych faz i uporządkowań spinowych, które nie występują w łańcuchach ściśle jednowymiarowych.

Nie mam wątpliwości, że przedstawiony cykl prac stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny, a w szczególności w zrozumienie własności magnetycznych, transportowych i topologicznych silnie skorelowanych układów niskowymiarowych. Prace przedstawiają szereg nietrywialnych wyników oraz nowych przewidywań dla orbitalno-selektywnej fazy Motta jednowymiarowych układów wielopasmowych. Zaprezentowane wyniki zostały uzyskane przy pomocy zaawansowanych metod numerycznych, co pozwoliło uzyskać bardzo dokładne i precyzyjne przewidywania dla całego zakresu parametrów badanych modeli, a w szczególności dla wielopasmowego modelu Hubbarda. Habilitant jest wysokiej klasy specjalistą jeżeli chodzi o zaawansowane metody numeryczne, takie jak grupa renormalizacji macierzy gęstości. Warto również podkreślić, że uzyskane rezultaty, poza czysto teoretycznymi aspektami, są także istotne dla głębszego zrozumienia własności fizycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych na bazie żelaza. O istotności cyklu habilitacyjnego świadczy także fakt, że prace, choć opublikowane stosunkowo niedawno, już uzyskały spory oddźwięk w literaturze – na dzień przygotowywania recenzji publikacje były cytowane łącznie ok. 100 razy.

### Ogólne osiągnięcia Kandydata

Całkowity dorobek Habilitanta na dzień złożenia wniosku obejmuje 37 publikacji, które ukazały się w najlepszych czasopismach fizycznych, w tym m.in. 4 prace w *Physical Review Letters*, 2 prace w *Nature Communications*, 25 prac w *Physical Review B*. Wszystkie publikacje były cytowane łącznie 490 razy, a indeks Hirscha Habilitanta wynosi 13. Jak na obecny etap kariery naukowej są to bardzo wysokie parametry bibliometryczne. Zakres tematyczny prac obejmuje najbardziej aktualne zagadnienia fizyki ciała stałego, ze szczególną uwagą na badanie własności silnie skorelowanych układów niskowymiarowych. Od strony metodologicznej Habilitant stosuje nowoczesne metody obliczeniowe, w tym metodę grupy renormalizacji macierzy gęstości, która pozwala uzyskać bardzo dokładne wyniki modeli opisujących jednowymiarowe łańcuchy czy też modele drabiniowe.

Warto również podkreślić, że Habilitant kieruje dwoma grantami badawczymi: jednym finansowanym przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej oraz projektem typu Opus z Narodowego Centrum Nauki. Dr Herbrych był również wykonawcą w dwóch innych projektach realizowanych na Uniwersytecie Kreteńskim oraz w Instytucie Jozefa Stefana w Ljubljanie. Habilitant wyniki swoich badań prezentował na wielu międzynarodowych konferencjach, wygłosił również kilkanaście zaproszonych referatów w instytucjach naukowych w kraju i za granicą. Ponadto, Kandydat przygotował dziewięć recenzji dla czasopism naukowych, prowadzi również szeroką współpracę naukową z innymi jednostkami naukowymi.

Jeżeli chodzi o działalność dydaktyczną, ze względu na naukowy charakter zatrudnienia podczas staży podoktorskich, dr Herbrych doświadczenie w tym zakresie zdobywał dopiero po powrocie do Polski, gdzie na Politechnice Wrocławskiej prowadził wykład z Modelowania układów skorelowanych, laboratoria z Numerycznych metod badania układów kwantowych oraz laboratoria z Fizyki statystycznej. Ponadto, Habilitant kieruje grupą badawczą w ramach projektu Polskie Powroty NAWA, jest także promotorem pomocniczym w jednym przewodzie doktorskim. Dr Herbrych był promotorem dwóch prac magisterskich i dwóch prac inżynierskich, jest także opiekunem koła naukowego „Nabla” na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej oraz członkiem komisji programowej kierunku „Inżynieria Kwantowa”.

#### Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożony cykl prac oraz ogólny dorobek Habilitanta z naddatkiem spełniają wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora habilitowanego. Nie mam również żadnych wątpliwości, że Habilitant wykazuje się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, w szczególności zagranicznej – spełnia tym samym wszystkie wymogi ustawowe. Wnoszę zatem o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania oraz **gorąco popieram wnioszek dr. Jacka Herbrycha o nadanie Mu stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.**

*Thomas Weymann*