

Prof. Jakub Tworzydło
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5, Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

magistra Szczepana Głodzika

pt. *"Influence of spin-orbit interactions on bound states in superconductors"*

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pana magistra Szczepana Głodzika została przygotowana w postaci zbioru artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Formę taką dopuszcza obecnie obowiązująca USTAWA z dnia 21 kwietnia 2017 r. (o zmianie ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym). Zbiór artykułów stanowiących treść niniejszej rozprawy obejmuje prace opublikowane w renomowanych, recenzowanych, międzynarodowych czasopismach, ponadto przedstawia spójną tematykę i podejmuje ciekawe zagadnienia badawcze. Jeden z artykułów został opublikowany w New Journal of Physics (IF=3,54), dwa w Physical Review B (IF=3,57) (przy czym drugi z nich jest w druku), jeden w Journal of Physics: Condensed Matter (IF=2,71), oraz jeden artykuł o charakterze przeglądowym opublikowany w Beilstein Journal of Nanotechnology (IF=2,61). Przedstawiona rozprawa zawiera też dodatkowo preprint jednego artykułu powstałego w szerokiej współpracy naukowej, który obecnie znajduje się w procesie recenzji w renomowanym czasopiśmie. Rozprawa opatrzona jest też krótkim wstępem obejmującym 25 stron, dodatkowym rozdziałem zawierającym skrótkowe podsumowanie przedstawionych prac, oraz zestawieniem najistotniejszych odnośników do literatury przedmiotu potrzebnych w tej wstępnej części pracy (77 pozycji). Wszystkie artykuły są napisane w języku angielskim, w tym języku autor sformułował również wstęp i podsumowania zawartych w rozprawie prac. W dalszej części niniejszej recenzji będę korzystał ze spisu prac podanego przez autora rozprawy, obejmującego pozycje od (I) do (VI).

W związku z tym, że wyniki pracy autora i ich prezentacja przeszły już przez sito procesu recenzji przed przyjęciem do druku i zostały zamieszczone w renomowanych czasopismach, mam niejako ułatwioną pracę jako recenzent. Od początku obcowania z przedstawionym manuskrytem rozprawy nie budzi moich wątpliwości, że zakres i stopień oryginalności badań kandydata bardzo dobrze spełnia wymagania stawiane na tym etapie rozwoju kariery naukowej i w pełni predestynuje p. Głodzika do otrzymania stopnia naukowego doktora nauk fizycznych. Tym niemniej, moim szczególnym zadaniem jest w tym przypadku zbadanie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Pomocą są tutaj dołączone do rozprawy oświadczenia współautorów, a także zwyczajowe ustalenia kolejności autorów prac.

Szereg prac, zamieszczonych w kolejności chronologicznej, powstałych w czasie studiów doktoranckich p. Szczepana Głodzika w latach 2017-2020 wydaje się dobrze ilustrować modelowy przebieg tego wczesnego etapu kariery naukowej.

Wkład kandydata do dwu pierwszych prac wskazuje na uczenie się warsztatu teoretyka. Prace te dokumentują opanowanie przez kandydata umiejętności prowadzenia złożonych obliczeń numerycznych, sumienności w krytycznym testowaniu wyników i klarowności w ich prezentacji. Kandydat jest drugim z autorów pracy (I), współautorem jest oczywiście promotor i starszy kolega występujący jako pierwszy autor. Praca (II) powstała w większym zespole, liczącym łącznie siedmiu autorów, jednak oświadczenia wskazują na dobrze określoną rolę p. Głodzika, który jest też pierwszym autorem tego artykułu. Kandydat jest w pracy (II) autorem jednego pełnego rozdziału spośród trzech rozdziałów merytorycznych. W pracy tej znajdujemy zatem dobrze postawione zadanie badawcze, ustalony zakres odpowiedzialności i odpowiednio udokumentowane rozwiązanie, wykonane w całości przez kandydata. Ponadto prace (I) i (II) są jednorodne metodologicznie, dotyczą podobnego modelu, rozwiązywanego w nieco zmienionej geometrii.

Kolejne trzy prace (III, IV i VI) ilustrują wzrastającą samodzielność autora i, stanowiąc niejako twarde jądro rozprawy, dokumentują rozwiązanie zasadniczego problemu badawczego. Listy autorów tych prac są bardzo krótkie, doktorant we wszystkich jest pierwszym autorem, oprócz promotora (w pracach (III) i (VI)) udokumentowana jest też współpraca z dwoma doświadczonymi badaczami (Teemu Ojanen w (IV) i Nicolas Sedlmayr w (II)). Z tak czytelnych list współautorów, oraz oczywiście z

dołączonych oświadczeń, jasno wynika twórczy i samodzielny wkład doktoranta.

W oświadczeniu o współautorstwie promotora do pracy (III) znajdujemy bardzo cenne określenie, które świadczy o tym, że doktorant sam zainicjował przedstawione w tej pracy rozszerzenie badań. Warto docenić tę publikację w dorobku kandydata, bowiem bardzo dobrze ukazuje jego dociekliwość i śmiałe podejmowanie nowych wątków badawczych. W artykule (III) wprowadzony został model nadprzewodnictwa pochodzący od efektu bliskości, w miejsce bardziej pracochłonnych obliczeń samouzgodnionych z prac (I) i (II). Takie modelowe podejście umożliwiło autorowi bardziej wyczerpujące przebadanie wpływu różnych mechanizmów oddziaływania spinowo-orbitalnego, w polaryzacji zarówno równoległej, jak i prostopadłej do płaszczyzny monowarstwy.

Praca (IV) powstała we współpracy kandydata z prof. Teemu Ojanenem (Uniwersytet w Tampere), tym razem bez współdziałania promotora. W dostępnym oświadczeniu szczególnie cieszy stwierdzenie „wspólnie rozwinęliśmy początkowy pomysł realizując ten projekt” (ang. „the initial idea was jointly developed during the project”), które świadczy o wysokim, skutecznym i twórczym zaangażowaniu w rozwiązanie problemu badawczego. Samodzielna współpraca z innym ośrodkiem badawczym stanowi na pewno bardzo cenne doświadczenie dla doktoranta. Opublikowany artykuł dokumentuje to, że kandydat może być cennym członkiem międzynarodowych grup badawczych i co więcej, ma wystarczające kwalifikacje i determinację, aby pracę doprowadzić do końca (do publikacji). W pracy (IV) została zaproponowana i teoretycznie zbadana propozycja heterostruktury warstwowej składającej się z dwuwymiarowego dichalkogenku metali przejściowych oraz z cienkiej warstwy ferromagnetyka. Zaproponowano modelowe, efektywne podejście do opisu takiego układu i w jego ramach zbadano doświadczalne cechy powstawania nodalnych faz topologicznych. Ta praca rozszerza arsenal metod badawczych kandydata o umiejętność modelowania innowacyjnych materiałów, zawiera też nową treść fizyczną dotyczącą nadprzewodzących faz nodalnych. Kandydat potrafi zatem prowadzić badania o różnorodnej zawartości problemów fizycznych, jednocześnie na tyle spójne tematycznie, aby można było uznać, że dotyczą jednego problemu naukowego.

W pełni rozwiniętą, zaawansowaną umiejętność kandydata w rozwiązywaniu problemów badawczych ilustruje praca (VI). Promotor podkreśla, że jedynie zdefiniował problem badawczy, natomiast współautor (Nicolas Sedlmayr) brał udział w dyskusjach i redakcji manuskryptu. Niewątpliwie

przeprowadzenie obliczeń, analiza wyników i ich prezentacja należały tutaj do doktoranta. Warto podkreślić, że kandydat w tej pracy integruje formalizm rozwijany przez drugiego współautora i kreatywnie z niego korzysta.

Niejako ukoronowaniem drogi rozwoju naukowego kandydata jest bardzo ambitny projekt, który dokumentuje załączony do rozprawy artykuł (V). Praca ta powstała we współpracy ze światowej klasy grupą doświadczalną, przy czym doktorant wraz z dwoma doświadczonym współpracownikami byli odpowiedzialni za wykonanie obliczeń modelowych i interpretację teoretyczną. Podkreślam, że bardzo popieram, i wysoko cenię dokonanie badawcze tej pracy. Znakomicie, że na tym etapie rozwoju młodego teoretyka przypadł mu udział w interpretacji nowatorskiego doświadczenia, co stanowi największą przygodę intelektualną dla rasowego fizyka. Jednak z punktu widzenia wymagań dotyczących rozprawy doktorskiej przedstawionej w formie serii artykułów mają na nią składać się jedynie prace już opublikowane, lub przyjęte do druku. Nie wątpię, że praca (V) zostanie wkrótce opublikowana w znakomitym czasopiśmie, proponuję zatem potraktować ją jako wybitny i wartościowy zadatek dorobku na następny stopień naukowy p. Szczepana Głodzika. Tym bardziej, że pozostałe artykuły z przedstawionej serii moim zdaniem w zupełności wyczerpują wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Cennym władem przedstawionej rozprawy jest podjęcie takich teoretycznych zagadnień badawczych, które są bliskie technikom i możliwościom grup eksperymentalnych. Podstawową wielkością fizyczną, którą bada autor, są przestrzennie rozdzielcze charakterystyki prądowo napięciowe, dostępne w bardzo precyzyjnych doświadczeniach z użyciem atomowo-rozdzielczych igieł STM. W pracach teoretycznych dostępne wielkości są przedstawiane w sposób syntetyczny jako (zależna od energii) lokalna gęstość stanów (LDOS). Konsekwentne stosowanie tej metodyki umożliwia doktorantowi znajdowanie i wykazywanie obecności stanów kwantowych związanych z egzotycznymi fazami topologicznymi materiałów nadprzewodzących. Narzędzie to jest też pomocne w badaniach teoretycznych nad lepszym zrozumieniem fizyki niskowymiarowych układów i szerokim badaniu parametrycznych obszarów, w których omawiane zjawiska mogą zachodzić. Wiodącymi tematami rozprawy jest badanie układów wielokomponentowych, z obszarami występującymi nie tylko w fazie nadprzewodzącej, ale także magnetycznej, czy też w pobliżu fazy izolatora topologicznego. Wydaje się, że uwzględnienie i kontrola komponentu spinowo-orbitalnego oddziaływań, oraz ograniczonej

geometrii układu, tak, jak czyni to kandydat, jest w tej dziedzinie kluczowym wyzwaniem. Gałąź badań jest nowatorska, z ciekawymi perspektywami dalszych odkryć, rozwijająca się zarówno dzięki wysiłkom doświadczalnym, materiałowym, jak i teoretycznym. Zarówno kandydatowi, jak i promotorowi należy się bardzo wysoka ocena i uznanie za śmiałe wkraczanie w tę tematykę.

Ostatni element mojej recenzji, przed sformułowaniem ostatecznego wniosku, powinien dotyczyć udokumentowaniu posiadania oceny pewnych elementów ogólnej wiedzy teoretycznej przez kandydata w jego dyscyplinie naukowej. Rozprawa opatrzona jest ogólnym wstępem, który w moim odbiorze nie jest wybitny, aczkolwiek jest poprawny. Odnoszę wrażenie pewnej szkicowości i pośpiechu w uzupełnianiu tej części rozprawy, brakuje organizacji myśli w formie akapitów, przemyślanego podziału na podrozdziały i następstwa logicznego przekazywanych zagadnień. Trzeba przyznać, że kandydat porusza się po rozległym obszarze badawczym, i zapewne niełatwo było z niego wybrać tylko te zagadnienia, które są najbardziej istotne w prezentowanej rozprawie. Oczekiwałbym jednak od wybitnego kandydata klarownego przedstawienia wstępu w ujęciu ponad- czy poza- podręcznikowym tak, aby tekst ten mógł być pomocą badaczom czy studentom szukającym wprowadzenia do niełatwej tematyki. Tym niemniej, wstęp dobrze ilustruje znajomość przez kandydata teoretycznych zagadnień dyscypliny oraz wprawę i płynność w poruszaniu się w bieżącej literaturze przedmiotu.

Ilustracją luk i pewnych nieścisłości występujących w rozprawie, i dołączonym do niej wstępie, niech będzie kwestia wprowadzenia i terminologii dotyczących tytułowego oddziaływania spinowo-orbitalnego. Terminologia prac (I) i (II) jest tutaj zgodna, nazywając wyrażenia zawierające operator Pauliego σ_z oddziaływaniem spinowo-orbitalnym spolaryzowanym w płaszczyźnie (ang. „in-plane polarization”), natomiast wyrażenia zawierające kombinację operatorów σ_x, σ_y oddziaływaniem spolaryzowanym poza płaszczyznę (ang. „out-of plane”). W kolejnej pracy (III) oddziaływanie spolaryzowane w płaszczyźnie nosi inną nazwę „spinowo zależnego hoppingu” (dokładniej „spin-dependent hopping amplitude λ_{SO} (in the Kane-Mele scenario)”) natomiast spolaryzowane poza płaszczyznę nazwane jest oddziaływaniem Rashby (ang. „Rashba spin-orbit interaction λ_R ”). Zamieszanie wprowadza termin użyty w pracy (IV): pozapłaszczyznowe oddziaływanie spinowo-orbitalne typu Isinga wydaje się być identyczne z oddziaływaniem spolaryzowanym w płaszczyźnie w terminologii poprzednich prac. W ostatniej pracy (VI) natomiast rozpatrywane jest jedynie

oddziaływanie typu Rashby. Wydaje mi się zasadne, aby w takiej sytuacji kandydat potrafił wyjaśnić pochodzenie fizyczne i mikroskopowe, a także ujednoczyć nazewnictwo dotyczące oddziaływania spinowo-orbitalnego. Odczuwam też brak dyskusji fizycznej, które wyrazy są dominujące, z jakimi rzędami wielkości mamy do czynienia i w jakich materiałach występują.

W kontekście oddziaływań spinowo-orbitalnych wyjaśnienia domagają się też stwierdzenia ze wstępu, gdzie mowa jest o złamanej symetrii powodującej powstawanie sprzężenia spinowo-orbitalnego typu Isinga (strona 25). Nasuwa się pytanie, o jaką symetrię chodzi i jaki jest mechanizm powstawania tego sprzężenia. W tym samym ustępie występuje też termin „unconventional Ising pairing” jako zjawisko występujące w pewnych dichalkogenkach metali przejściowych. W pracy (IV) dotyczącej takiego materiału znajduję jednak w równaniu (1) zupełnie konwencjonalny model parowania na węźle.

Podsumowując, mogę stwierdzić, że autor wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną i samodzielnością badawczą w rozwiązywaniu oryginalnego problemu naukowego. W twórczy sposób połączył modelowy opis układów wielomateriałowych w ograniczonej geometrii i uzyskał rozwiązania dostosowane do wyzwań konkretnej sytuacji fizycznej. Udokumentował umiejętność uzyskiwania wniosków jakościowych a także pewnych przewidywań ilościowych, jak także, co szczególnie cenne, dążył do bezpośredniego porównania swoich wyników z wynikami doświadczalnymi.

Wobec powyższych wniosków stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca z nawiązką spełnia wszystkie zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu.

Grodzisk Mazowiecki, 22.09.2020 r.

