

Uniwersytet Warszawski

Prof. Jakub Tworzydło

+48-225532919; jakub.tworzydlo@fuw.edu.pl

ulica Pasteura 5, 02-093 Warszawa, Polska



**Recenzja osiągnięcia naukowego oraz aktywności naukowo-badawczej
doktora Piotra Trochy
w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.**

Sylwetka kandydata.

Kandydat do stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych, pan dr Paweł Trocha uzyskał tytuł zawodowy magistra w roku 2006 broniąc z wyróżnieniem pracy magisterskiej o tytule „Efekty interferencji kwantowej i korelacji elektronowych w transporcie przez kropki kwantowe”. Pracę przygotował pod kierunkiem prof. Józefa Barnasia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Stopień naukowy doktora nauk fizycznych otrzymał, tak samo jak tytuł magistra, na UAM w Poznaniu i także pod opieką promotorską prof. Józefa Barnasia. Tytuł przedstawionej rozprawy doktorskiej brzmiał: „Wpływ efektów interferencyjnych i korelacji kulombowskich na transport elektronowy przez układy kropek kwantowych”, a stopień doktora został nadany w lipcu 2011 roku. Za pracę doktorską kandydat nie tylko otrzymał wyróżnienie, ale także zdobył prestiżową Nagrodę Prezesa Rady Ministrów.

Bezpośrednio po uzyskaniu doktoratu kandydat został zatrudniony na Wydziale Fizyki UAM na stanowisku adiunkta. Przez kolejne lata, aż do chwili składania dokumentacji habilitacyjnej, czyli przez 12 lat był stale zatrudniony na tym samym stanowisku, w tej samej instytucji.

Kandydat wykazywał się natomiast dużą aktywnością w wykonywaniu i pozyskiwaniu grantów. Był w szczególności wykonawcą w jednym grantie międzynarodowym, oraz w siedmiu krajowych. Otrzymał grant NCN „Miniatura” dla młodych naukowców na lata 2019-2020. Zdobył też prestiżowy grant NCN „Sonata”, i kieruje nim w latach 2019-2024. Płynne, stałe, skuteczne pozyskiwanie i uczestnictwo w grantach przez kandydata utrzymuje się zatem na bardzo wysokim poziomie przez cały czas przebiegu jego kariery naukowej.

Spełnienie warunku ustawowego uczestniczenia kandydata w badaniach naukowych prowadzonych przez instytucje różne od macierzystej, a w szczególności w badawczych instytucjach międzynarodowych, może być niestety nieco dyskusyjne. Kandydata nie odbył typowego stażu podoktorskiego. Tym niemniej, odbywał cztery krótko-terminowe staże (do 2 tygodni do 2 miesięcy) w dwu instytucjach zagranicznych (Centre de Physique Theorique, Marsylia, oraz University of Balearic Islands, Majorka). Współpracę międzynarodową zaczął też rozwijać stosunkowo późno, jego pierwszy wyjazd miał miejsce w 2018 roku, czyli 7 lat po doktoracie. Przychyliłbym się tutaj też do wyjaśnień kandydata, że bezpośrednie kontakty przerwała mu pandemia, i dopiero w ubiegłym i bieżącym roku miał te współprace odbudowywać.

Nie budzi natomiast wątpliwości pozytywna recepcja i rozpowszechnienie wyników badań kandydata w środowisku międzynarodowym. Świadczy o tym 10 komunikatów ustnych (referatów) wygłoszonych przez kandydata na konferencjach międzynarodowych, oraz trzy referaty zaproszone, prezentowane także na międzynarodowych, uznanych konferencjach, poza granicami kraju. Uważam, że jest to wynik bardzo dobry jak na kandydata do stopnia doktora habilitowanego, i z pewnością kompensuje niedostatki współpracy w formie mobilności pomiędzy instytucjami.

Ocena sylwetki badawczej kandydata jest niewątpliwie pozytywna, z krótkiego przeglądu przebiegu kariery wyłania się obraz zdolnego, pracowitego, samodzielnego i wydajnego naukowca.

Charakterystyka osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę wniosku habilitacyjnego.

Osiągnięcie naukowe, które zostało przedstawione do oceny, udokumentowane jest cyklem 10 prac. Prace te niewątpliwie prezentują spójną tematykę, jednocześnie świadczą o wnikliwości i dociekliwości naukowej kandydata, ujmując wiele różnych aspektów fizycznych w ramach jednej metodologii badawczej. Listy współautorów prac są bardzo krótkie: jedna praca jest trzy-autorska, 7 prac jest dwu-autorskich, i dwie są jedno-autorskie. W dwu pracach współautorem jest doktorant, nad którym kandydat sprawuje opiekę. Trzy prace powstały we współpracy z prof. Weymannem, natomiast trzy inne we współpracy z promotorem doktoratu prof. Barnasiem. Oświadczenia współautorów o wkładzie w powstanie prac są konsyistentne i potwierdzają niewątpliwą wiodącą rolę kandydata, także w zakresie koncepcji prowadzonych badań, w powstaniu tych prac. Ważne jest, aby cykl składający się na osiągnięcie habilitacyjne dokumentował rozwój kandydata do samodzielności naukowej. W rozpatrywanym tu przypadku kilku prac przygotowanych razem z (byłym) promotorem doktoratu, ale stanowiących tylko o jednym z wątków całego cyklu, ten warunek jest w moim przekonaniu przekonująco spełniony.

Wszystkie prace przedstawione do oceny przez kandydata zostały opublikowane w międzynarodowych, uznanych, recenzowanych czasopismach. Siedem prac cyklu opublikowano w bardzo dobrych czasopismach, o współczynniku IF przekraczającym 3. Prace publikowane były w

latach 2012-2022, czyli w rozciągłości czasowej właściwej do przygotowania znaczącego wkładu naukowego, wymaganego przy ubieganiu się o habilitację. Od strony formalnej cykl publikacyjny w moim przekonaniu w zupełności wypełnia warunek spójnego, samodzielnego dorobku o znacznym wpływie na dziedzinę badań.

Opis i ocena merytoryczna badań ujętych w osiągnięciu.

Prace przedstawionego cyklu tworzą dwie wyróżniające się grupy, powiązane wewnątrznie tematyką. Pierwsza z nich to prace [H3, H4, H5], które są osią całego osiągnięcia, ustanawiają w szczególności metodologię badań stosowaną przez kandydata. Prace [H7, H8] tematycznie mieszczą się także w tej grupie, stanowiąc istotne rozwinięcie. W drugiej grupie mieszczą się prace [H2, H10, H10] wyróżnione tym, że autora bada w nich własności termoelektryczne. Stosunkowo nowa praca [H9] przynosi ciekawe zastosowanie rozwijanej wcześniej metodyki badań. Z drugiej strony, najwcześniejsza praca cyklu [H1] powstała jeszcze w ścisłym związku z zainteresowaniami pracy doktorskiej i ma niewielki wpływ na moją ocenę znaczenia przedstawianego osiągnięcia.

Omówię najpierw tematycznie zwartą grupę badań zebraną przez kandydata w artykułach: [H3], [H4] i [H5]. Autor zagłębia się w nich w szereg nieoczywistych własności spolaryzowanego spinowo transportu w układach kropek kwantowych z indukowanym zjawiskiem odbicia Andreeva. Rozpatrywane są różne konfiguracje kropek kwantowych, lecz wspólnym mianownikiem tych hybrydowych układów jest połączenie z elektrodą nadprzewodzącą, oraz elektrodami ferromagnetycznymi. Rolą sprzężenia do elektrody nadprzewodzącej jest wprowadzenie odbicia Andreeva, natomiast elektrody ferromagnetyczne pozwalają na monitorowanie spinowo zależnych prądów. Układy analizowane są w takim reżymie, że konieczne jest uwzględnienie oddziaływań kulombowskich wewnątrz kropki, oraz pomiędzy kropkami w najbardziej złożonej konfiguracji rozpatrywanej w pracy [H5].

Kandydat początkowo stosuje warsztat teoretyczny opracowany na potrzeby wcześniejszej pracy [H2]. Wykorzystuje metody nierównowagowych funkcji Greena, z przybliżeniami dokonywanymi w ich równaniach ruchu przez analogię do argumentów średnio-polowych. Konieczność stosowania wyrafinowanych podejść teoretycznych jest związana z dążeniem autora do realistycznego ujęcia korelacji elektronowych. W kolejnych pracach [H4, H5] rozwija i stosuje bardziej zaawansowane podejście, posiadające strukturę diagramatyczną, a wynikające z perturbacyjnego uwzględnienia sprzężeń z elektrodami. Rachunek prowadzony jest w czasie rzeczywistym, co pozwala badać własności stanów kwazi-stacjonarnych a także ogólniejsze własności nierównowagowe. Prowadzone przez autora rachunki i badania zapewniają dogłębny wgląd w fizykę współ-zachodzących zjawisk kulombowskich, konfiguracji magnetycznych i charakterystyk transportowych.

W pracy [H3] badania koncentrują się na układzie składającym się z dwóch kropek kwantowych sprzężonych z ferromagnetycznymi (lub niemagnetycznymi) elektrodami oraz jednej, wspólnej elektrody nadprzewodzącej. Badanie naświetla wpływ ferromagnetyzmu i oddziaływań

kulombowskich na procesy tunelowania Andreeva, podkreślając rolę bezpośredniego i skrzyżowanego odbicia Andreeva w generowaniu par Coopera, oraz działania całości układu jako rozdzielacz takich par. W szczególności, asymetria w sprzężeniach kropek z nadprzewodnikiem prowadzi do intrygujących efektów interferencyjnych, podczas gdy manipulacja konfiguracjami magnetycznymi znacząco wpływa na zachowanie transportowe.

Opierając się na tych podstawach, w pracy [H4] kandydat zbadał spolaryzowany spinowo transport Andreeva w układzie hybrydowym obejmującym kropkę kwantową sprzężoną z nadprzewodnikiem i elektrodami ferromagnetycznymi. Rozszerzony warsztat teoretyczny pozwala analizować reżimy tunelowania sekwencyjnego i ko-tunelowania, badanie wyjaśnia złożone zależności magnetooporu tunelowego od pozycji poziomów kropek i napięć w elektrodach. Co więcej, wskazano na istotną przyczynę występowania zerowej anomalii w przewodnictwie Andreeva, rzucając światło na zjawiska nierównowagowej akumulacji spinów.

Rozszerzając zakres badań, w pracy [H5] zbadano transport Andreeva z rozdzielaniem spinów przez podwójne kwantowo-kropkowe rozdzielacze par Coopera z ferromagnetycznymi przewodnikami. W pracy kandydat skrupulatnie przedyskutował wpływ różnych parametrów, w tym konfiguracji poziomów kropek i pól magnetycznych, na charakterystyki transportu, takie jak prąd Andreeva, przewodnictwo różniczkowe i magnetoopór tunelowy. Godne uwagi odkrycia obejmują identyfikację anomalii zerowego napięcia i zwiększonego magnetooporu tunelowego w określonych reżimach transportu, a także dyskusję wierności splątania między rozszczepionymi elektronami pary Coopera.

Badania z prac [H3], [H4] i [H5] pogłębiają nasze zrozumienie spolaryzowanych spinowo zjawisk transportu Andreeva w układach kropek kwantowych, oferując cenny wgląd w podstawowe mechanizmy i torując drogę do przyszłych postępów w inżynierii i zastosowaniach urządzeń kwantowych.

W pracach [H7] i [H8] cyklu kandydat kontynuował badanie właściwości transportowych rozdzielacza par Coopera opartego na kropkach kwantowych. Wykorzystał technikę diagramatyczną w czasie rzeczywistym w sekwencyjnym reżimie tunelowania, która w tych analizach pozwoliła na obliczanie krzyżowych korelacji prądowych.

Okazało się, że poszerzenie badań o korelacje prądowe pozwala rozróżnić wkład do prądu Andreeva od procesów bezpośredniego odbicia Andreeva (DAR) oraz krzyżowego odbicia Andreeva (CAR). W przypadku braku pola magnetycznego i przy niemagnetycznych elektrodach, korelacje prądowe zanikają w pobliżu punktu symetrii elektron-dziura, świadcząc o nieskorelowanym transporcie rozdzielonych par. Zastosowanie ferromagnetycznych elektrod wymusza natomiast skorelowany stan rozdzielonych elektronów. W konfiguracji równoległej elektrod ferromagnetycznych istnieje konkurencja pomiędzy procesami CAR i DAR, podczas gdy w konfiguracji antyrównoległej procesy CAR dominują. W szczególnym przypadku elektrod półmetalicznych w konfiguracji antyrównoległej występują tylko procesy CAR, a korelacje między-prądowe stają się maksymalne.

Analiza przedstawiona w pracy [H8] rozszerza powyższe podejście wprowadzając asymetryczne sprzężenie kropki kwantowej z elektrodami ferromagnetycznymi. Autor pokazuje, że asymetria sprzężenia tłumi korelacje krzyżowe niezależnie od konfiguracji magnetycznej elektrod.

Łącznie, odkrycia z prac [H7] i [H8] zapewniają pogłębiony wgląd w mechanizmy wpływające na właściwości transportowe w rozszczepiaczach par Coopera opartych na kropkach kwantowych. Prace te są naturalną kontynuacją i istotnym rozszerzeniem wcześniej omawianej grupy prac [H3, H4, H5].

Kolejną grupę prac, spójnych tematycznie ze względu na badane w nich własności fizyczne, tworzą prace [H2], [H6] oraz [H10]. Kandydata koncentruje się w nich na badaniu efektów termoelektrycznych w różnych układach kropek kwantowych. Tak jak poprzednio, rozpatrywane są układy hybrydowe sprzężone z różnymi rodzajami elektrod, w tym elektrodami metalicznymi, ferromagnetycznymi, nadprzewodzącymi i izolatorami magnetycznymi. Badania wykorzystują ramy teoretyczne nierównowagowego formalizmu funkcji Greena, przybliżenie typu Hartree-Focka dla oddziaływań kulombowskich [H2] oraz rozwinięcie perturbacyjne w granicy słabego sprzężenia [H10].

W artykule [H2] zbadano konwencjonalne i zależne od spinu efekty termoelektryczne w układzie podwójnej kropki kwantowej sprzężonej z elektrodami ferromagnetycznymi. Kandydata interesował szczególnie wpływ zjawisk interferencyjnych i oddziaływań kulombowskich na właściwości termoelektryczne. Kandydat wykazał, że kwantowe efekty interferencyjne znacznie zwiększają wydajność termoelektryczną, zwłaszcza gdy efekty interferencyjne są intencjonalnie zwiększane. Co więcej, oddziaływania kulombowskie mogą dodatkowo zwiększyć wydajność termoelektryczną. W pracy zbadano również wpływ asymetrii w sprzężeniu elektrod na właściwości termoelektryczne i omówiono potencjalne zastosowanie systemu jako termicznego analogu zaworu spinowego. Wydaje się, że praca ta była pionierskim osiągnięciem w badaniach efektów termoelektrycznych w układach z kropkami kwantowymi, stała się inspiracją dla wielu późniejszych badań.

W kolejnym artykule [H6] kandydat badał właściwości transportowe i termoelektryczne układów hybrydowych, poszerzając poprzednie analizy o dodanie do układu elektrody nadprzewodzącej. Analizy procesów w takim układzie wymagała odpowiedniego ujęcia współzawodnictwa procesów tunelowania par Coopera i tunelowania pojedynczych cząstek. Kandydat pokazał, że transport pojedynczych cząstek do stanów powyżej lub poniżej przerwy nadprzewodzącej jest odpowiedzialny za wyraźne właściwości termoelektryczne. W pracy zbadano również wpływ korelacji kulombowskich wewnątrz kropki na współczynniki termoelektryczne.

W pracy [H10] kandydat skoncentrował się na badaniu spinowo-zależnych właściwości termoelektrycznych układu hybrydowego z kropką kwantową. Nowatorskość podejścia polegała tu na wprowadzeniu dodatkowej elektrody - izolatora magnetycznego, posiadającego wzbudzenia kolektywne w postaci fal spinowych. Przeanalizowano spinowe współczynniki termoelektryczne, w tym przewodnictwo spinowe, spinowe współczynniki Seebecka i spinowe współczynniki Peltiera, w

różnych warunkach dominującego lub też skończonego odpychania kulombowskiego. Udało się uzyskać w pewnych sytuacjach granicznych wyniki analityczne na te współczynniki, a także omówić warunki, w których system może działać bardziej efektywnie, podkreślając zerową przewodność cieplną systemu i wydajność Carnota.

Ogólnie rzecz biorąc, artykuły [H2, H6, H10] przyczyniają się do zrozumienia skomplikowanej interakcji między różnymi czynnikami, takimi jak: efekty interferencyjne, oddziaływania kulombowskie i szczegółowe właściwości materiałowe w określaniu zachowania termoelektrycznego układów kropek kwantowych, zarówno konwencjonalnie, jak i dla zjawisk zależnych od spinu.

Ciekawe zastosowaniem metodologii badawczej rozwiniętej przez kandydata zaprezentowano w pracy [H9]. Uzyskane wyniki dotyczą transportu spolaryzowanego spinowo w układzie czterech kropek kwantowych ułożonych w sieci kwadratowej i podłączonych do ferromagnetycznych elektrod. Motywacją do tego badania są niedawno uzyskane eksperymentalne charakterystyki przypisywane nietrywialnemu porządkowi ferromagnetycznemu typu Nagaoki, powstającemu w układach kropek kwantowych. Badanie koncentruje się na analizie właściwości transportu spinowego obliczanych przy użyciu technik funkcji Greena, przede wszystkim w granicy odpowiedzi liniowej. Manipulując wewnątrz-kropkowymi oddziaływaniami kulombowskimi, i między-kropkowymi sprzężeniami, kandydat znajduje tunelowy magnetoopór oraz polaryzację spinową prądu. Dzięki temu, udaje mu się pokazać, że zmiana znaku polaryzacji spinowej prądu rzeczywiście wskazuje na pojawienie się ferromagnetycznego porządku Nagaoki w układzie.

Pozostałe elementy oceny dorobku kandydata.

Kandydat opublikował łącznie 35 prac, w tym 15 przed i 20 po doktoracie. Wskaźniki bibliometryczne wynoszą 720 cytowań (wg Web of Science) przy indeksie Hirscha $H = 16$. Najwyżej cytowana praca cyklu [H2] „Large enhancement of thermoelectric effects in a double quantum dot system due to interference and Coulomb correlation phenomena”, a jednocześnie najwyżej cytowana praca autora w ogóle, z roku 2012 ma zgromadzonych 170 cytowań. Każda z sześciu prac cyklu [H1-H6] powstałych do roku 2017, jest cytowana ponad 20 razy. Cztery nowsze prace cyklu, z lat 2018, 2019, i 2022 są słabiej cytowane, jednak może być to związane z krótszym czasem ich recepcji w środowisku, a raczej nie z ich jakością.

Oceniając łącznie wskaźniki cytowalności należy uznać je za znakomite, na pewno ponadprzeciętne. Świadczą one niewątpliwie o międzynarodowej, już ugruntowanej recepcji prac kandydata i potwierdzają jego znaczący wkład w rozwój dziedziny. Jakość naukowa wszystkich prac kandydata, także tych powstałych w ostatnich latach, wydaje się natomiast utrzymywać na równym, wysokim poziomie.

Oprócz samych prac cyklu, kandydat publikował także w zbliżonej tematyce. Szczególnie ciekawa jest tu praca z Phys. Rev. B z 2018 roku o efekcie Kondo w symetrii SU(4), indukowanym przy pomocy

hybrydowego układu kropek kwantowych. Praca ta powstała we współpracy z naukowcami z Budapesztu i Oradei.

W ramach działalności dydaktycznej kandydat poprowadził liczne zajęcia w formie ćwiczeń rachunkowych, oraz kilka wykładów. W szczególności, wykładał bardziej zaawansowane, specjalistyczne przedmioty takie jak „Elektornika spinowa” czy „Wstęp do fizyki magnetyzmu”. Prowadził też regularne, kursowe wykłady z „Matematyki elementarnej”, „Elementów fizyki” czy „Fizyki teoretycznej”. Cała jego działalność dydaktyczna odbywała się oczywiście w ramach Wydziału Fizyki UAM. Miał także kontakt z młodzieżą szkół średnich, prowadząc „Klasy Akademickie” na UAM.

Kandydat był promotorem jednej pracy magisterskiej, promotorem pomocniczym jednej pracy doktorskiej, obecnie opiekuje się też dwojgiem doktorantów (na razie w roli promotora pomocniczego). Kandydat wykazuje się zatem potencjałem do kształcenia młodej kadry naukowej i budowy własnej grupy badawczej.

Nie wydaje się, aby kandydat spełniał się w zakresie działalności organizacyjnej, popularyzatorskiej, czy nowatorskiego podejścia do dydaktyki. Nie znalazłem w wykazie osiągnięć elementów z tego zakresu, które warto wzmiankować.

Konkluzja

Na podstawie przeprowadzonej analizy wniosku pana dr. Piotra Trochy, której najważniejsze wyniki przedstawiłem w powyższej recenzji, stwierdzam z pełnym przekonaniem, że przedłożone osiągnięcia naukowe spełnia warunki określone w *Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Z przyjemnością wnoszę o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie pana dr. Piotra Trochy do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Grodzisk Mazowiecki, 10.04.2024 r.

