



INSTYTUT FIZYKI MOLEKULARNEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Poznań, 8 kwietnia 2024 r.

dr hab. Grzegorz Michałek

Zakład Teorii Nanostruktur i Materiałów Kwantowych

tel.: +48 61 86 95 242

email: grzechal@ifmpan.poznan.pl

Recenzja osiągnięcia naukowego dr. Piotra Trochy pt.:

Efekty transportu ładunku, spinu i ciepła w układach kropek kwantowych

w związku z prowadzonym postępowaniem

w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego

w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne

Profil naukowy Habilitanta

Dr Piotr Trocha w roku 2006, na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza (UAM) w Poznaniu, obronił (z wyróżnieniem) pracę magisterską pt. *Efekty interferencji kwantowej i korelacji elektronowych w transporcie przez kropki kwantowe*. W roku 2011, również na UAM w Poznaniu, na podstawie rozprawy doktorskiej (uznanej za wyróżniającą) pt. *Wpływ efektów interferencyjnych i korelacji kulombowskich na transport elektronowy przez układy kropek kwantowych*, uzyskał stopień naukowy doktora nauk fizycznych. Promotorem magistranta, a następnie doktoranta był prof. dr hab. Józef Barnaś.

Od roku 2011 Habilitant jest zatrudniony na Wydziale Fizyki UAM w Poznaniu, w Zakładzie Fizyki Mezoskopowej, na stanowisku adiunkta. Po uzyskaniu stopnia doktora odbył krótkoterminowe staże badawcze w: Nanophysics Group, Centre de Physique Theorique, Marseille, France (2022 – 3 tygodnie; 2019 – 1 miesiąc); Institute for Cross-Disciplinary Physics and Complex Systems, University of Balearic Islands, Palma de Mallorca, Spain (2020 – 1 miesiąc; 2019 – 1 miesiąc; 2018 – 2 tygodnie, wizyta na zaproszenie).

Omówienie osiągnięcia naukowego

(o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2b ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.)

Tytułowe osiągnięcie stanowi cykl 10 powiązanych tematycznie artykułów naukowych, opublikowanych w recenzowanych czasopismach (spełniają wymagania ustawowe) o wysokiej międzynarodowej renomie, znajdujących się w bazie *Journal Citation Reports (JCR)*:

[H1] **P. Trocha**, *The role of the indirect tunneling processes and asymmetry in couplings in orbital Kondo transport through double quantum dots*, *J. Phys.: Cond. Matter* **24**, 055303 (2012).

- [H2] **P. Trocha**, J. Barnaś, *Large enhancement of thermoelectric effects in a double quantum dot system due to interference and Coulomb correlation phenomena*, *Phys. Rev. B* **85**, 085408 (2012).
- [H3] **P. Trocha**, J. Barnaś, *Spin-polarized Andreev transport influenced by Coulomb repulsion through a two quantum-dot system*, *Phys. Rev. B* **89**, 245418 (2014).
- [H4] I. Weymann, **P. Trocha**, *Superconducting proximity effect and zero-bias anomaly in transport through quantum dots weakly attached to ferromagnetic leads*, *Phys. Rev. B* **89**, 115305 (2014).
- [H5] **P. Trocha**, I. Weymann, *Spin-resolved Andreev transport through double-quantum-dot Cooper pair splitters*, *Phys. Rev. B* **91**, 235424 (2015).
- [H6] **P. Trocha**, J. Barnaś, *Spin-dependent thermoelectric phenomena in a quantum dot attached to ferromagnetic and superconducting electrodes*, *Phys. Rev. B* **95**, 165439 (2017).
- [H7] **P. Trocha**, K. Wrzeźniewski, *Cross-correlations in a quantum dot Cooper pair splitter with ferromagnetic leads*, *J. Phys.: Cond. Matter* **30**, 305303 (2018).
- [H8] **P. Trocha**, *Cross-Correlations in Transport through a Quantum Dot Cooper Pair Splitter Asymmetrically Coupled to Normal Leads*, *Acta Phys. Pol. A* **135**, 1279 (2019).
- [H9] **P. Trocha**, E. Siuda, I. Weymann, *Spin-polarized transport in quadruple quantum dots attached to ferromagnetic leads*, *J. Magn. Magn. Mater.* **546**, 168835 (2022).
- [H10] **P. Trocha**, E. Siuda, *Spin-thermoelectric effects in a quantum dot hybrid system with magnetic insulator*, *Sci. Rep.* **12**, 5348 (2022).

6 publikacji [H2-H6, H10] pochodzi z czasopism o bardzo wysokiej randze naukowej: 1 [H10], *Scientific Reports*, współczynnik wpływu $IF > 4,5$; 5 [H2-H6], *Physical Review B*, $IF > 3,7$. W 2 publikacjach [H1, H8] Habilitant jest jedynym autorem, w 7 [H2, H3, H5-H7, H10] jest pierwszym autorem, a jedynie w 1 [H4] jest drugim autorem. Całkowita liczba współautorów: w 2 publikacjach [H1, H8] wynosi 1, w 7 [H2-H7, H10] wynosi 2, a tylko w 1 [H9] wynosi 3.

Z załączonych do publikacji oświadczeń wynika, że Habilitant:

- zainicjował badania proponując temat w 7/8 („w 7 na 8”) publikacjach [H2-H7, H10];
- opracował koncepcję pracy w 6/8 publikacjach [H2, H3, H6, H7, H9, H10] oraz współopracował w 2/8 publikacjach [H4, H5];
- wykonał wszystkie obliczenia analityczne w 4/7 publikacjach [H2, H3, H6, H10] oraz wyprowadził zero-temperaturowe formuły analityczne w 2/7 publikacjach [H4, H5];
- przygotował kody obliczeniowe w 7/8 publikacjach [H2-H7, H9] oraz częściowo w 1/8 publikacjach [H10];
- wykonał wszystkie obliczenia numeryczne w 5/8 publikacjach [H2, H3, H6, H7, H9] oraz częściowo w 3/8 publikacjach [H4, H5, H10];
- wykonał wszystkie rysunki w 4/8 publikacjach [H2, H3, H6, H9] oraz wszystkie oprócz Fig. 1 w 2/8 publikacjach [H7, H10];
- zinterpretował wyniki w 6/8 publikacjach [H2, H3, H6, H7, H9, H10] oraz częściowo (udział dominujący) w 1/8 publikacjach [H5] a także częściowo w 1/8 publikacjach [H4];
- napisał tekst artykułu w 6/8 publikacjach [H2, H3, H6, H7, H9, H10] oraz większą część tekstu artykułu w 1/8 publikacjach [H5] a także fragmenty tekstu artykułu w 1/8 publikacjach [H4];
- napisał odpowiedzi na recenzje w 2/8 publikacjach [H7, H10] a także wstępną wersję odpowiedzi na recenzje oraz brał udział w redakcji ich ostatecznej postaci w 6/8 publikacjach [H2, H3-H6, H9].

Na podstawie *Autoreferatu* i *Oświadczeń udziału* wynika, że dr Piotr Trocha w pełni samodzielnie przygotował 2 publikacje [H1, H8] oraz wniósł zdecydowanie największy wkład do 7 wieloautorskich artykułów cyklu [H2, H3, H5-H7, H9, H10], w których jest pierwszym autorem. W publikacji [H4], w której jest na drugim miejscu na liście autorów, również odegrał znaczącą rolę, ponieważ: zaproponował temat pracy, współopracował koncepcję pracy, przygotował kody i wykonał część obliczeń

numerycznych, wyprowadził zero-temperaturowe wzory analityczne, napisał fragmenty tekstu artykułu, brał udział w interpretacji wyników i rewizji ostatecznej wersji artykułu, napisał wstępną wersję odpowiedzi na recenzje oraz brał udział w redakcji ich ostatecznej postaci.

Autoreferat zawiera dobrze sformułowany cel i przedstawia wyniki osiągnięcia naukowego. Został napisany poprawną polszczyzną, jest logicznie skomponowany i przejrzyste zredagowany. Habilitant w przekonujący sposób uzasadnia wybór kropek kwantowych na przedmiot swoich badań nawiązując do ich fascynujących właściwości fizycznych oraz potencjalnych zastosowań w nanoelektronice, spintronice, kalorytronice spinowej i informatyce kwantowej. Na rozprawę habilitacyjną składają się spójne tematycznie prace teoretyczne, w których przedstawiono badania efektów ładunkowych, spinowych i termoelektrycznych w transporcie przez kropki kwantowe. Poniżej przedstawiam krótkie omówienie najciekawszych rezultatów poszczególnych prac.

W publikacji jednoautorskiej [H1] Habilitant opisał wpływ efektów interferencyjnych (tj. procesów tunelowania elektronów między kropkami kwantowymi poprzez elektrodę) na orbitalny efekt Kondo w układzie dwóch kropek kwantowych podłączonych do wspólnych elektrod metalicznych. Obliczenia wykonał w granicy nieskończone silnych oddziaływań kulombowskich. W badaniach uwzględnił, zwykle zaniedbywane, efekty renormalizacji poziomów kropek kwantowych wywołane tunelowaniem pośrednim. Jeżeli brak bezpośredniego sprzężenia tunelowego między kropkami kwantowymi to w lokalnej gęstości stanów, transmisji oraz przewodności widoczny jest efekt Dicke. Gdy bezpośrednio przeskok elektronów między kropkami kwantowymi są dozwolone to w transmisji wyłania się antyrezonans Fano. Szczegółowo przeanalizowano zależność obu efektów od parametrów układu, w tym asymetrii sprzężeń kropek kwantowych z elektrodami. Pokazano, że efekt Dicke i efekt Fano są bardzo czułe na zmianę wartości pośrednich sprzężeń tunelowych (tj. przez elektrody) między kropkami kwantowymi. Znalaziono również, że wraz ze zmniejszaniem sprzężeń pośrednich obniża się temperatura Kondo. Liczba cytowań (*Web of Science*): **21** (**19** bez autocytoowań).

W publikacji [H2] przedstawiono wyniki badań konwencjonalnych własności termoelektrycznych (i ich spinowych odpowiedników) układu, który składa się z dwóch połączonych kropek kwantowych umieszczonych równolegle pomiędzy metalicznymi elektrodami zewnętrznymi. W obliczeniach uwzględniono oddziaływania kulombowskie na kropkach kwantowych, sprzężenia pośrednie (poprzez elektrody) między kropkami kwantowymi, wzajemną konfigurację magnetyczną elektrod, a także akumulację spinową w elektrodach. Zaproponowany model pozwolił na przeanalizowanie wpływu zjawisk interferencyjnych oraz tych wynikających z oddziaływań kulombowskich na efekty termoelektryczne. Pokazano, że współdziałanie efektów interferencji kwantowej (antyrezonansu Fano) oraz oddziaływań kulombowskich prowadzi do ogromnego wzrostu wartości współczynnika efektywności termoelektrycznej, a więc układ może znaleźć zastosowanie w urządzeniach do efektywnej konwersji energii cieplnej na elektryczną i odwrotnie. Przedstawiono sposób kontroli efektów termoelektrycznych poprzez zmianę asymetrii sprzężeń danej elektrody z kropkami kwantowymi (np. napięciem bramki). W szczególności wykazano, że można sterować przewodnictwem cieplnym zmieniając konfigurację magnetyczną elektrod, co wskazuje na potencjalne zastosowanie układu jako cieplnego analogu zaworu spinowego. Liczba cytowań (*Web of Science*): **171** (**160** bez autocytoowań współautorów).

W publikacji [H3] przeanalizowano własności transportowe układu, który składa się z dwóch kropek kwantowych połączonych z oddzielnymi elektrodami normalnymi i wspólną elektrodą nadprzewodzącą. W zależności od napięcia przyłożonego do elektrod, układ może działać jako rozdzielacz lub jako generator par Coopera, sterowany przez napięcia bramki przyłożone do kropek kwantowych. Szczegółowo przedyskutowano wpływ: oddziaływań kulombowskich, asymetrii połączeń z elektrodami, polaryzacji/konfiguracji magnetycznej elektrod ferromagnetycznych, sprzężenia pośredniego (poprzez elektrodę nadprzewodzącą) kropek kwantowych, na własności transportowe układu w niskich temperaturach i dla napięć, które są znacznie mniejsze od szerokości przerwy nadprzewodzącej (tj. gdy normalne procesy tunelowe są zablokowane). Dla maksymalnej wartości sprzężenia pośred-

niego, w wyniku rozprężnięcia zdegenerowanych stanów Andreeva od elektrody nadprzewodzącej, znika centralny pik w transmisji. Oddziaływania kulombowskie są odpowiedzialne za pojawienie się asymetrii w przewodności (dla położenia poziomów kropek kwantowych nie spełniających warunku symetrii elektron-dziura). Odpowiadają również za ujemne wartości przewodności dla pewnych zakresów napięć transportowych. Asymetria w połączeniach kropek kwantowych z nadprzewodnikiem odpowiada z kolei za efekty interferencyjne widoczne w przewodności. Co ciekawe, dla każdej wartości polaryzacji magnetycznej elektrod ferromagnetycznych, można znaleźć taką wartość parametru asymetrii dla której przewodność osiąga wartość maksymalną. Pokazano również, że z analizy właściwości transportowych w obu konfiguracjach magnetycznych można w pośredni sposób określić intensywność nielokalnych (CAR) i lokalnych (DAR) procesów Andreeva. Liczba cytowań (*Web of Science*): **36** razy (**31** bez autocytowań współautorów).

W publikacji [H4] przestudiowano spinowo-spolaryzowany transport Andreeva w układzie hybrydowym, w którym kropka kwantowa jest połączona z nadprzewodnikiem i słabo sprzężona tunelowo z dwiema elektrodami ferromagnetycznymi. Badania przeprowadzono w tzw. *limicie atomowym* (tj. w przybliżeniu nieskończenie szerokiej przerwy nadprzewodzącej), dla realistycznych parametrów kropki kwantowej, uwzględniając zarówno procesy tunelowania sekwencyjnego jak i procesy współtunelowania. W rozpatrywanym modelu do całkowitego prądu Andreeva wnoszą wkład procesy DAR i CAR. Wyznaczono prądy Andreeva (oraz odpowiadające im przewodności) w przypadku równoległej i antyrównoległej konfiguracji magnetyzacji elektrod. W konfiguracji równoległej, w wyniku nierównowagowej akumulacji spinowej w kropce kwantowej (dla nieparzystego obsadzenia) wywołanej procesami Andreeva, przewodność może przyjmować wartości ujemne. Efekt nie występuje w konfiguracji antyrównoległej. Zależności magnetooporu tunelowego (TMR) od położenia poziomu kropki kwantowej oraz napięcia są bardzo skomplikowane. Dla napięć odpowiadających plateau przewodności TMR ma stałą wartość i został opisany prostymi wzorami analitycznymi. Pokazano, że procesy współtunelowania nie wpływają w istotny sposób na prądy (przewodność) Andreeva jednak mogą znacznie zmodyfikować TMR (który może zostać znacznie wzmocniony lub przyjmować ujemne wartości) w obszarach blokady, w których procesy sekwencyjne są wygaszane. Ważnym rezultatem, otrzymanym w konfiguracji równoległej, było znalezienie anomalii zero-napięciowej w przewodności i wyjaśnienie jej pochodzenia: anomalia jest związana z nierównowagową akumulacją spinową na kropce kwantowej, która wynika ze współzawodnictwa procesów współtunelowania z odwróceniem spinu a procesami Andreeva. Liczba cytowań (*Web of Science*): **31** razy (**17** bez autocytowań współautorów).

W publikacji [H5] przedstawiono własności transportowe rozdzielacza par Coopera zbudowanego z dwóch identycznych kropek kwantowych dołączonych do oddzielnych elektrod ferromagnetycznych (wykonanych z tego samego materiału) i wspólnej elektrody nadprzewodzącej. Obliczenia wykonano w limicie sekwencyjnego tunelowania, dla szerokiej przerwy energetycznej i zakładając takie same: oddziaływania kulombowskie w kropkach kwantowych jak i między nimi, słabe sprzężenia tunelowe kropka kwantowa-elektroda ferromagnetyczna, sprzężenia kropka kwantowa-nadprzewodnik. Zbadano zachowanie prądu Andreeva, przewodności i TMR zarówno w zakresie liniowym (małych napięć) jak i nieliniowym (dużych napięć), eksplorując całą przestrzeń parametrów rozważanego modelu. Dla nieskończenie dużych oddziaływań kulombowskich w kropkach kwantowych, tzn. gdy w układzie dozwolone są jedynie procesy CAR, w wyniku obsadzenia stanów trypletowych, przepływ prądu Andreeva zostaje zablokowany dla pewnych zakresów napięć i położenia poziomów energetycznych kropek kwantowych. Pokazano, że nawet względnie duże, ale skończone, oddziaływania kulombowskie na kropkach kwantowych powodują wyciek prądu Andreeva do blokady trypletowej spowodowany aktywacją procesów DAR. Znaleziono, że w obszarze blokady trypletowej TMR jest wzmocniony, co wskazuje na rolę procesów CAR w transporcie. Szczegółowo przeanalizowano wpływ rozszczepienia stanów Andreeva wywołany: rozstrojeniem położenia poziomów energetycznych kropek kwantowych,

włączeniem sprzężenia tunelowego między nimi, efektem Zeemana (w zewnętrznym polu magnetycznym). W pierwszych dwóch przypadkach własności transportowe przypominają te bez rozszczepienia (z wyjątkiem liczby obszarów o ujemnej przewodności). W przypadku rozszczepienia Zeemana charakterystyki przewodności i TMR są bardziej złożone. Na koniec wykazano, że poprzez odpowiednie dobranie parametrów układu można wydobyć z nadprzewodnika i przesłać do elektrod normalnych w pełni splątane pary elektronów. Liczba cytowań (*Web of Science*): **41** razy (**33** bez autocytowań współautorów).

W publikacji [H6] omówiono konwencjonalne i spinowe efekty termoelektryczne w układzie hybrydowym, który składa się z kropki kwantowej (z oddziaływaniem kulombowskim) połączonej z elektrodą ferromagnetyczną i nadprzewodnikiem. Zaniedbano wkład fononów do przewodnictwa cieplnego. W przybliżeniu odpowiedzi liniowej, za własności termoelektryczne układu w głównej mierze odpowiada wywołane różnicą temperatur tunelowanie kwazicząstek do stanów powyżej (poniżej) przerwy nadprzewodzącej. Pomimo, że procesy Andreeva nie dają bezpośredniego wkładu do przewodnictwa cieplnego ani nie generują termosiły to mogą w znaczny sposób wpływać na własności termoelektryczne układu (termosiłę i współczynnik efektywności termoelektrycznej) w sposób pośredni: poprzez zmianę warunku całkowitej kompensacji prądu ładunkowego, która prowadzi do znacznych modyfikacji przewodnictwa cieplnego (nawet dla stanów kropki kwantowej zlokalizowanych głęboko w przerwie nadprzewodzącej). Największe wzmocnienie termosiły i współczynnika efektywności termoelektrycznej (oraz ich spinowych odpowiedników) znaleziono dla stanów kropki kwantowej zlokalizowanych w pobliżu krawędzi przerwy nadprzewodzącej (ze względu na silny wzrost gęstości stanów). Oddziaływania kulombowskie prowadzą do złożonych zależności współczynników termoelektrycznych w funkcji położenia poziomu kropki kwantowej. Natomiast polaryzacja magnetyczna elektrody ferromagnetycznej znacznie modyfikuje odpowiedź termoelektryczną jedynie w przypadku efektów spinowych. Liczba cytowań (*Web of Science*): **22** razy (**20** bez autocytowań współautorów).

W publikacji [H7] przeanalizowano krzyżowe (nielokalne) korelacje (szумы) prądowe, w zależności od różnych parametrów modelowego układu z pracy [H4], zarówno w zakresie liniowym (małych napięć) jak i nieliniowym (dużych napięć). Badania przeprowadzono w limicie tunelowania sekwencyjnego, w zależności od zewnętrznego pola magnetycznego, polaryzacji spinowej elektrod ferromagnetycznych oraz ich wzajemnej konfiguracji magnetycznej. Omówiono procesy i mechanizmy prowadzące do wzmocnienia, tłumienia lub zmiany znaku krzyżowych korelacji prądowych. Znalaziono, że w otoczeniu punktu symetrii elektron-dziura w przypadku elektrod: niemagnetycznych – znikają krzyżowe korelacje prądowe, co oznacza, że elektrony, które tunelują z nadprzewodnika do prawej i lewej elektrody nie są skorelowane; ferromagnetycznych – krzyżowe korelacje prądowe przyjmują wartości dodatnie, co świadczy o splątaniu rozdzielonych elektronów spowodowanym procesami CAR. Umieszczenie układu niemagnetycznego w zewnętrznym polu magnetycznym wywołuje zmiany krzyżowych korelacji prądowych: wzmocnia amplitudę korelacji dodatnich (dla niektórych zakresów napięć i położeń poziomów kropki kwantowej) oraz osłabia korelacje ujemne. Przeprowadzono analizę krzyżowych korelacji prądowych w zależności od polaryzacji spinowej elektrod ferromagnetycznych. Z wzorów analitycznych, wyprowadzonych dla punktu symetrii elektron-dziura wynika, że w przypadku równoległej konfiguracji magnetyzacji elektrod współzawodnictwo między procesami CAR i DAR ma bardzo złożony charakter. Z kolei dla konfiguracji antyrównoległej, wraz ze wzrostem polaryzacji spinowej elektrod ferromagnetycznych, wkład procesów CAR stopniowo rośnie. Gdy elektrody są półmetalami to wkład do prądów Andreeva pochodzi wyłącznie od procesów CAR, a krzyżowe korelacje prądowe osiągają wartość maksymalną. Liczba cytowań (*Web of Science*): **7** razy (**5** bez autocytowań współautorów).

W publikacji jednoautorskiej [H8] Habilitant zbadał wpływ asymetrii sprzężeń kropki kwantowej z elektrodami normalnymi na krzyżowe korelacje prądowe w modelowym układzie z artykułu [H4]. Obliczenia wykonano w limicie tunelowania sekwencyjnego dla przypadku elektrod niema-

gnetycznych, ferromagnetycznych (dla równoległej i antyrównoległej konfiguracji magnetyzacji) lub półmetalicznych (w konfiguracji antyrównoległej) w punkcie symetrii elektron-dziura. Pokazano, że wraz ze wzrostem asymetrii sprzężeń, niezależnie od polaryzacji spinowej elektrod i ich wzajemnej konfiguracji magnetycznej, amplituda krzyżowych korelacji prądowych maleje. Oznacza to, że procesy CAR, które są bardzo czułe na zmiany konfiguracji magnetycznej, wraz ze wzrostem asymetrii sprzężeń również są tłumione. Znalaziono również, że wraz ze wzrostem asymetrii sprzężeń, krzyżowe korelacje prądowe maleją wolniej w przypadku konfiguracji antyrównoległej niż równoległej. Liczba cytowań (*Web of Science*): **1** raz (**1** bez autocytowań).

Publikacja [H9] została zainspirowana niedawnymi doniesieniami o obserwacji, w układach z kropkami kwantowymi, ferromagnetyzmu Nagaoki. Przeanalizowano (w zakresie odpowiedzi liniowej) zależny od spinu transport elektronowy w układzie **4** identycznych kropek kwantowych, z których dwie sąsiadnie są dołączone do zewnętrznych elektrod ferromagnetycznych wykonanych z tego samego materiału. TMR oraz polaryzacja prądowa silnie zależą od wartości oddziaływań kulombowskich w kropkach kwantowych oraz napięć bramek. Jeżeli oddziaływania kulombowskie są mniejsze od wartości krytycznej, tzn. gdy warunek ferromagnetyzmu Nagaoki nie jest spełniony, to TMR jest silnie tłumiony, elektrony w układzie dążą do uporządkowania antyferromagnetycznego, a polaryzacja prądowa jest dodatnia (w funkcji położenia poziomu kropki kwantowej). Jeżeli natomiast warunek Nagaoki jest spełniony, tzn. gdy oddziaływania kulombowskie są większe od wartości krytycznej, to TMR zostaje wzmocniony, a polaryzacja prądowa, w pobliżu punktu symetrii elektron-dziura, przyjmuje wartości ujemne. Ta gwałtowna zmiana znaku polaryzacji prądowej (w funkcji położenia poziomu kropki kwantowej) może wskazywać na zmianę porządku magnetycznego układu kropek kwantowych. Liczba cytowań (według bazy *Web of Science*): **0**.

W publikacji [H10] przeanalizowano spinowe efekty termoelektryczne w układzie kropki kwantowej połączonej z elektrodą metaliczną oraz z izolatorem magnetycznym. Cały układ został umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym, które wywołuje rozszczepienie Zeemana poziomu energetycznego kropki kwantowej. W modelu zaniedbano wkład fononowy do przewodnictwa cieplnego. Różnica temperatur między izolatorem magnetycznym (źródłem magnonów) a elektrodą metaliczną (rezerwuarem elektronów) wywołuje przepływ prądu spinowego przez kropkę kwantową. Kropka kwantowa pełni w układzie rolę kowertera magnonowego prądu spinowego na prąd spinowy pochodzenia elektronowego, bądź na odwrót. W przybliżeniu odpowiedzi liniowej wyprowadzono wzory analityczne opisujące spinowy efekt Seebecka i spinowy efekt Peltiera. Spinowy współczynnik Seebecka zależy od temperatury i przyłożonego pola magnetycznego, natomiast spinowy współczynnik Peltiera jest równy energii przenoszonej przez magnon. Pokazano, że oba współczynniki są związane relacjami wzajemności Onsagera. Wykazano, że przewodnictwo cieplne układu (przy warunku zaniku prądu spinowego) jest równe zero (tzn. prąd cieplny również zanika), a więc, niezależnie od przyjętych parametrów, układ pracuje z wydajnością Carnota. Szczegółowo przeanalizowano zależność przewodności spinowej od różnych parametrów układu. Wprowadzenie współczynnika mocy spinowej pozwoliło wskazać warunki, w których układ pracuje najefektywniej. Liczba cytowań (według bazy *Web of Science*): **4** razy (**4** bez autocytowań współautorów).

W publikacjach [H1-H10] Habilitant rozważał różnorodne modelowe kombinacje układów kropek kwantowych i elektrod zewnętrznych, w tym układy hybrydowe zawierające: elektrodę/elektrody ferromagnetyczne i elektrodę nadprzewodzącą lub elektrodę metaliczną i izolator magnetyczny. Badania teoretyczne przeprowadzono w sposób kompleksowy, rozpatrując różne granice sprzężeń między układem kropek kwantowych, a elektrodami zewnętrznymi oraz różne wartości sprzężeń bezpośrednich i pośrednich między kropkami kwantowymi. W celu uchwycenia istotnych efektów interferencyjnych (Dicke, Fano), nadprzewodzącego efektu bliskości i korelacji elektronowych (kulombowskich, typu Kondo, oddziaływań wymiennych) na własności transportowe Habilitant użył zaawansowanych metod analitycznych i algorytmów numerycznych (bozonów pomocniczych, nierównowagowych funkcji

Greena, metody diagramów, procedury skalowania, równania master Pauliego). W rezultacie cykl publikacji [H1-H10] zawiera cały szereg oryginalnych i wartościowych wyników, które nie tylko mają dużą wartość poznawczą, ale posiadają również znaczny potencjał aplikacyjny. Z wyżej wymienionych powodów rezultaty badań Habilitanta wzbudziły zrozumiałe zainteresowanie środowiska naukowego, o czym świadczą m.in. liczne cytowania. Według bazy *Web of Science* całkowita liczba cytowań cyklu publikacji [H1-H10] wynosi **334 (290 bez autocytowań współautorów)**. Potwierdza to, że mamy do czynienia z badaniami naukowymi na najwyższym światowym poziomie, które zauważono i doceniono w środowisku naukowym na całym świecie.

Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych Habilitanta

- **Dorobek naukowy** (*Web of Science*): łącznie **37** oryginalnych prac twórczych (w tym **5** prac jednoautorskich), opublikowanych w recenzowanych czasopismach o zróżnicowanej randze naukowej. **22** prace (w tym **2** jednoautorskie) zostały opublikowane w okresie po uzyskaniu stopnia doktora, a **15** (w tym **3** jednoautorskie) w okresie przed uzyskaniem stopnia doktora. Po uzyskaniu stopnia doktora, poza artykułami [H1]-[H10], Habilitant został współautorem **12** publikacji w: *Phys. Rev. B* – **3**, *J. Magn. Magn. Mater.* – **2**, *J. Phys.: Cond. Matter* – **2**, *Acta Phys. Pol. A* – **4**, *AIP Conf. Proc.* – **1**).
- **Liczba cytowań** (*Web of Science*): **723** razy (**645** bez autocytowań), z czego **1** praca była cytowana **171** razy, **1** praca **95** razy, a **12** prac posiada cytowania w zakresie **20-50**. Artykuły opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora cytowano **437** razy, natomiast prace opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora cytowano **286** razy.
- **Indeks Hirscha** (*Web of Science*): **16**.
- Łącznie **41** wystąpień na **konferencjach i szkołach o zasięgu międzynarodowym**, zarówno w formie plakatowej (**8** po doktoracie, **20** przed doktoratem), jak i w formie referatów (**11** po doktoracie, w tym **2** na zaproszenie – w 2016 i 2022; **2** przed doktoratem, w tym **1** referat na zaproszenie typu *keynote speaker* – w 2009).
- **Staże badawcze**: Centre de Physique Theorique, Marseille, France (2022 – 3 tygodnie, 2019 – 1 miesiąc); IFISC, University of Balearic Islands, Palma de Mallorca, Spain (2020 – 1 miesiąc, 2019 – 1 miesiąc, 2018 – 2 tygodnie – wizyta na zaproszenie). W ramach współpracy z grupą z Francji, kierowaną przez prof. Thierry’ego Martina opublikowano **1** artykuł, w którym Habilitant jest pierwszym autorem. W przygotowaniu jest kolejna publikacja. W ramach współpracy z grupą naukowców z IFISC, kierowaną przez prof. Davida Sancheza i prof. Rose Lopez, habilitant wykonał wstępne obliczenia do dwóch projektów badawczych oraz wygłosił seminarium.
- **Kierownik projektu badawczego NCN „Sonata-15”** pt. *Spinowo-zależne efekty termoelektryczne w nanoskopowych układach hybrydowych* (2019-2024). W latach 2019–2020 **kierownik projektu badawczego NCN „Miniatura-2”** pt. *Nieliniowe efekty termoelektryczne w układzie kropki kwantowej sprzężonej z ferromagnetycznymi elektrodami*. Oprócz tego **wykonawca w 8** projektach badawczych (**4** po doktoracie; **4** przed doktoratem, w tym **1** grant promotorski i **1** projekt europejski w ramach programu EUROCORES).
- **Recenzent**: **79** artykułów w **19** czasopismach naukowych o międzynarodowym zasięgu, w tym: *Physical Review Letters* **5**, *Physical Review B* – **17**. Oceniał również abstrakty nadesłane na międzynarodowe konferencje z serii *The European Conference PHYSICS OF MAGNETISM* – w 2023 i 2021.
- **wykonawca opracowania** pt. *Modelowanie oraz wykonanie obliczeń dotyczących wpływu gazów przez zawór bezpieczeństwa ze zbiornika reakcyjnego*, na zamówienie przedsiębiorstwa, w 2021.
- Obecnie: **promotor pomocniczy 2 doktorantów**. W latach 2020-2022: **promotor magistranta**, a w latach 2012-2017: **promotor pomocniczy doktoranta**.

- **Zajęcia dydaktyczne dla studentów UAM** w Poznaniu: **5** wykładów, **10** ćwiczeń, **1** seminarium, **4** laboratoria. W latach 2011-2019: **zajęcia dla uczniów szkół średnich** w ramach uniwersyteckich „Klas Akademickich”. **Współorganizacja stanowiska dydaktycznego** na interaktywnej wystawie „Od monokryształu Jana Czochralskiego do grafenu”, 26.05–01.06.2014.
- W latach 2008-2022: **17 wyróżnień (nagród i stypendiów)** wynikających z prowadzonych badań naukowych, m.in.: nagroda Prezesa Rady Ministrów na rozprawę doktorską, **6** stypendiów (FNP, UAM, EU, Poznań, Rodziny Kulczyków), **7** nagród JM Rektora UAM

Habilitant może poszczycić się dużą liczbą bardzo dobrych publikacji, wśród których znajdują się artykuły w wartościowy sposób uzupełniające rezultaty badań opisanych w *Autoreferacie*. Na uwagę zasługuje znaczna liczba cytowań, która przekłada się na bardzo wysoki (jak na ten etap kariery) indeks Hirscha równy **16**. Habilitant prezentował rezultaty swoich badań podczas licznych konferencji międzynarodowych, w tym na zaproszenie. O dobrej rozpoznawalności Habilitanta przez środowisko naukowe świadczy duża liczba recenzji dla renomowanych czasopism naukowych o bardzo wysokim współczynniku wpływu. Godnym uwagi jest nawiązanie przez Habilitanta współpracy naukowej z dwiema bardzo dobrymi grupami teoretycznymi (z Francji i z Hiszpanii), w których odbył on kilka krótkoterminowych staży naukowych. Warto przy tej okazji również wspomnieć, o dwóch pracach na temat efektu Kondo o symetrii SU(4) w układzie dwóch kropek kwantowych, które powstały we współpracy z naukowcami z Uniwersytetu Oradejskiego w Rumunii oraz Budapesztańskiego Uniwersytetu Techniczno-Ekonomicznego na Węgrzech. Ponadto Habilitant zdobywał środki na badania naukowe w postaci projektów, którymi kierował. Ma on również ogromne doświadczenie dydaktyczne: prowadził liczne zajęcia dla studentów UAM oraz opiekował się magistrantami i doktorantami. Na koniec należy dodać, że aktywność naukowa Habilitanta była wielokrotnie doceniana przez organizacje przyznające nagrody i wyróżnienia za działalność naukową. Te wszystkie osiągnięcia dowodzą, że Habilitant posiada wszelkie niezbędne umiejętności oczekiwane od samodzielnego pracownika naukowego.

Podsumowując całość recenzji stwierdzam, że w mojej ocenie, **osiągnięcia naukowe dr. Piotra Trochy** stanowią znaczny wkład w rozwój dyscypliny *nauki fizyczne* i odpowiadają wymaganiom określonym w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.).

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie **dr. Piotra Trochy** do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie *nauki ścisłe i przyrodnicze*, w dyscyplinie *nauki fizyczne*.

Grzegorz Michalek