

**Recenzja dorobku naukowego dr Piotra Trochy pt. „Efekty transportu ładunku, spinu i ciepła w układach kropek kwantowych” będącego podstawą wszczęcia postępowania w sprawie nadania mu stopnia doktora habilitowanego.**

Recenzowany przeze mnie dorobek naukowy dr Piotra Trochy dotyczący procedury nadania mu stopnia doktora habilitowanego przedstawiony jest w cyklu 10 artykułów naukowych opublikowanych w latach 2012-2022. Wszystkie prace przedstawiają teoretyczne badania różnych aspektów związanych z transportem ładunku oraz wymiany ciepła oraz spinu w układach uformowanych przez kropki kwantowe. Prace te tworzą zwartą tematycznie całość i w zdecydowanej większości zostały opublikowane w wysoko notowanych czasopismach naukowych.

W przedstawionym mi do zrecenzowania materiale omawiane były układy złożone z dwóch kropek kwantowych (prace H1, H2, H3, H5, według oznaczeń wprowadzonych przez Autora w Autoreferacie), jednej kropki (prace H4, H6, H7, H8 i H10) oraz system utworzony przez cztery kropki kwantowe (praca H9).

Praca H1 dotyczy badań transportu ładunku w układzie utworzonym przez dwie kropki kwantowe połączone równolegle z zewnętrznymi elektrodami metalicznymi. W układzie tym oddziaływanie pomiędzy kropkami jest dwuskładnikowe: z jednej strony ma charakter kulombowski zaś z drugiej strony zachodzi również poprzez bezpośrednie tunelowanie. W pracy tej analizowany, był między innymi, wpływ pośredniego sprzężenia kropek poprzez stany elektronowe w elektrodach. Przeprowadzone badania pokazują, że pośrednie tunelowanie prowadzi do rezonansu Kondo, którego charakter zależy wielkości bezpośredniego sprzężenia tunelowania pomiędzy kropkami.

Przeprowadzone w dalszej kolejności badania dotyczyły spinowo-spolaryzowanego transportu Andreeva w układach kropek kwantowych będących w kontakcie z elektrodami ferromagnetycznymi i nadprzewodzącymi. W tym kontekście analizowana była możliwość zastosowania tego typu układów do rozdzielania par Coopera. Badania te zostały przedstawione w pracach H3, H5 oraz H7, H8.

Praca H3 przedstawia badania układu złożonego z dwóch kropek kwantowych dołączonych do oddzielnych ferromagnetycznych elektrod spiętych wspólną nadprzewodzącą elektrodą. Przeprowadzone badania dotyczyły efektów związanych z ferromagnetyzmem normalnych elektrod oraz oraz wpływem oddziaływań kulombowskich i asymetrii oddziaływań z elektrodami. Otrzymane w trakcie tych badań wyniki pokazują, że asymetria w sprzężeniu pomiędzy kropkami i elektrodami wynikająca z kontaktu z normalną i nadprzewodzącą elektrodą ma bardzo istotny wpływ na przebieg procesu transportu w całym układzie. W szczególności zostało pokazane, że oddziaływanie z ferromagnetycznymi elektrodami powoduje rozmycie odbicia Andreeva zaś efektywność oddziaływania z nadprzewodzącą elektrodą ma wpływ na jego położenie. Pokazano także, że wpływ oddziaływań kulombowskich na kropki prowadzi do asymetrii różniczkowej przewodności.



Podobny układ (tzn. złożony z dwóch kropek, dwóch oddzielnych ferromagnetycznych elektrod oraz nadprzewodzącego łącznika spinającego obie kropki) był przedmiotem badań opisanych w pracy H5. W tym przypadku uwzględnione zostały oddziaływania kulombowskie zarówno na kropkach jak też pomiędzy nimi. Celem przeprowadzonych badań było określenie zależności prądu Andreeva, różniczkowej przewodności, oraz tunelowego magnetooporu od różnych parametrów charakteryzujących model. W szczególności przeprowadzona została analiza transportu ze spinową rozdzielczością w warunkach krzyżowego odbicia Andreeva, gdy zachodzi blokada prądu spowodowana zwiększeniem obsadzenia stanu trypletowego. Zostało pokazane, że duże oddziaływania kulombowskie na kropkach powodują przepływ prądu Andreeva do blokady trypletowej.

Badania przedstawione w pracach H4, H7 i H8 dotyczyły spinowo-spolaryzowanego transportu w układzie złożonym z kropki kwantowej oddziałującej z dwiema normalnymi elektrodami ferromagnetycznymi oraz jedną elektrodą nadprzewodzącą. W pracy H4 pokazano, między innymi, że procesy kotunelowania znacząco modyfikują zachowanie tunelowego magnetooporu w obszarze blokady kulombowskiej jak również w obszarze nieobsadzonej lub podwójnie obsadzonej kropki kwantowej, gdzie zachodzi silne tłumienie procesów sekwencyjnych. Wykazano także występowanie w obszarze kulombowskiej blokady z pojedynczym elektronem nietrywialnej zależności tunelowego magnetooporu od napięcia z minimum występującym dla zerowego napięcia, w przeciwieństwie do sekwencyjnego tunelowego magnetooporu, który jest stały. Ta nietrywialna zależność jest konsekwencją zależności prądu Andreeva oraz różniczkowej przewodności od przyłożonego napięcia.

Materiał omówiony w pracach H7 i H8 dotyczy tego samego układu, który rozważany był w pracy H4, ale w tym przypadku badania były skoncentrowane na opisie prądowych korelacji krzyżowych. Przeprowadzona analiza pozwoliła na rozróżnienie różnych wkładów do prądu Andreeva oraz określenie udziału procesów związanych z krzyżowym odbiciem Andreeva. Zbadane zostały, między innymi, zależności krzyżowej korelacji prądowej od zewnętrznego pola magnetycznego, polaryzacji spinowej ferromagnetycznych elektrod czy ich konfiguracji magnetycznej. Badania dotyczyły mechanizmów odpowiedzialnych za wzmocnienie lub osłabienie tych korelacji czy zmiany ich znaków. Pokazano, że niemagnetyczne elektrody powoduje zanikanie korelacji prądowych, co prowadzi do nieskorelowanego transportu rozdzielonych par Coopera. Z drugiej strony wprowadzenie ferromagnetycznych elektrod zamiast niemagnetycznych przywraca skorelowanie rozdzielonych elektronów w procesie transportu.

Z kolei prace H2, H6 i H10 dotyczą konwencjonalnych oraz spinowych efektów termoelektrycznych. Opisane w nich badania dotyczyły układów złożonych z dwóch kropek oddziałujących z dwoma normalnymi magnetycznymi, metalowymi elektrodami (praca H2), pojedynczej kropki oddziałujących normalną ferromagnetyczną elektrodą oraz elektrodą nadprzewodzącą (praca H6) jak również jednej kropki sprzęgniętej z magnetycznym izolatorem oraz metalową elektrodą (praca H10).

W pracy H2 analizowane były podstawowe charakterystyki odnoszące się do termoelektrycznego transportu. Zbadane zostały termoelektryczne efekty w kontekście ich



wpływu na przewodność cieplną układu złożonego z dwóch kropek. Kluczowa kwestia, której dotyczyły te badania, związana była z wpływem efektów interferencyjnych na przebieg procesów termoelektrycznych. Pokazane zostało, że zjawiska interferencyjne mogą znacząco zwiększyć wydajność termoelektryczną. Na jej zwiększenie mają również wpływ oddziaływania kulombowskie. Powadzi to do wniosku, że efektywność zjawisk termoelektrycznych może być kontrolowana temperaturowo, oraz poprzez oddziaływania kulombowskie czy efekty interferencyjne.

Badania opisane w pracy H6 odnosiły się do efektów termoelektrycznych zachodzących w układzie złożonym z kropki kwantowej sprzęgniętej z normalną elektrodą ferroelektryczną i elektrodą nadprzewodzącą. Uzyskane wyniki pokazują, że transport kwazicząsteczek do stanów elektronowych ulokowanych powyżej lub poniżej przerwy energetycznej nadprzewodnika jest odpowiedzialny w istotny sposób za termoelektryczne własności całego układu. Z drugiej strony pokazano, że tunelowanie Andreeva nie wnosi wkładu do termosiły oraz przewodności cieplnej. Z drugiej strony czynnik ten, czyli tunelowanie Andreeva, znacząco wpływa na własności termoelektryczne układu poprzez ich zależność od przewodności elektrycznej. Przeprowadzone badania pokazują również, że silny wzrost gęstości stanów w pobliżu krawędzi przerwy energetycznej półprzewodnika prowadzi do silnego wzmocnienia efektów termoelektrycznych, zarówno konwencjonalnych jak także spinowych.

W pracy H10 przedstawiono badania dotyczące spinowych efektów termoelektrycznych zachodzących w układzie, w którym pojedyncza kropka kwantowa oddziałuje z magnetycznym izolatorem oraz z metalową elektrodą. Magnetyczny izolator jest tutaj źródłem magnonów zaś metaliczna elektroda pełni funkcję źródła elektronów. Gradient temperatury przyłożony do tych elektrod powoduje przepływ prądu spinowego, któremu nie towarzyszy prąd ładunkowy. Pokazano, że przy odpowiednio dobranych warunkach, elektron o określonym spinie może tunelować do elektrody metalicznej, zaś elektron o przeciwnym spinie może tunelować z tej elektrody do kropki kwantowej. W pracy H10 przedstawiono analityczne formuły odnoszące się do spinowych efektów Seebecka oraz Peltiera. Otrzymane wyrażenia pozwoliły na interpretację obu efektów.

Praca oznaczona w Autoreferacie jako H9 dotyczy stosunkowo niedawno zarejestrowanemu doświadczalnie ferromagnetyzmowi Nagaoki mającego miejsce w układach kropek kwantowych. Publikacja H9 opisuje badania spinowo-zależnego procesu transportu elektronowego zachodzącego w układzie utworzonym przez cztery kropki kwantowe połączone z dwiema ferromagnetycznymi elektrodami. W układzie tym dwie gałęzie szeregowo sprzężonych kropek podłączone są równolegle do dwóch zewnętrznych elektrod. Przedyskutowane w tej pracy wyniki pokazały, że charakterystyki transportowe takie jak tunelowy magnetoopór czy polaryzacja prądowa są silnie zależne od warunku ferromagnetyzmu Nagaoki nałożonego na wartości oddziaływań kulombowskich. Pokazano, że poniżej krytycznej wartości oddziaływań kulombowskich gdy nie jest spełniony warunek zapewniający występowanie ferromagnetyzmu Nagaoki, tunelowy magnetoopór jest silnie tłumiony. Natomiast powyżej tej krytycznej wartości magnetoopór doznaje silnego wzrostu. Wykazane zostało również, że warunek na pojawienie się ferromagnetyzmu Nagaoki ma



także silny wpływ na polaryzację prądu. Otrzymane wyniki pokazują, że gdy ten warunek nie jest spełniony i w konsekwencji elektrony tworzą uporządkowanie antyferromagnetyczne, polaryzacja prądowa ma wartości dodatnie. Z drugiej strony, gdy oddziaływania kulombowskie są większe od wartości krytycznej, polaryzacja prądu przybiera również wartości ujemne. Otrzymane wyniki pokazują zatem, że zmiany znaku polaryzacji spinowej mogą być powiązane ze zmianą porządku magnetycznego układu kropek kwantowych.

Przedstawiony mi do recenzowania cykl prac *Efekty transportu ładunku, spinu i ciepła w układach kropek kwantowych* stanowi powiązaną tematycznie całość. Tematyka badań przedstawionych w tych pracach zakotwiczona jest w obszarze fizyki określanym jako spintronika, który jest aktualnie intensywnie rozwijany w wielu uznanych ośrodkach badawczych. Zainteresowanie tą tematyką spowodowane jest między innymi możliwymi powiązaniem z nowoczesnymi technologiami przekazu informacji, których kontrolowana spinowa polaryzacja nośników prądu elektrycznego mogłaby być wykorzystywana podobnie jak to ma miejsce z ładunkiem elektrycznym tych nośników. Połączenie tego aspektu z własnościami kropek kwantowych, które przy współczesnych możliwościach technicznych można w trakcie eksperymentu modyfikować i kontrolować, czyni całość niezwykle atrakcyjną na płaszczyźnie badań podstawowych jak również w kontekście technologicznych zastosowań. Na ten aspekt Autor zwraca zresztą uwagę w tekście Autoreferatu. W tym kontekście należą zwrócić uwagę, że recenzowany dorobek naukowy ma charakter ściśle teoretyczny. Z reguły w poszczególnych pracach analizowana jest charakterystyka rozważanych modeli i ich zależność od opisujących je parametrów w zakresach wynikających z ogólnej wiedzy dotyczących istoty badanych zagadnień. W tym kontekście brakuje chyba odniesienia do konkretnych danych pomiarowych, które mogłyby zapewnić bezpośredni kontakt z doświadczalnymi grupami badawczymi. Omawianym cykl prac powstał bowiem bez bezpośredniego współdziałania badań doświadczalnych. W zawiązku z tym, w przeprowadzonych badaniach nawiązywanie przez ich Autora do kontekstu eksperymentalnego ma charakter bardzo pośredni. W mojej opinii czynnik ten nie umniejsza jednak naukowej wartości recenzowanego dorobku, który ilustruje bardzo duże doświadczenie dr Piotra Trocha w tematyce stanowiącej podstawę jego postępowania habilitacyjnego zarówno od strony merytorycznej jak również stosowanej przez niego metodologii.

W mojej opinii 10 prac wchodzących w zakres cyklu *"Efekty transportu ładunku, spinu i ciepła w układach kropek kwantowych"* charakteryzuje merytorycznie dobrze zdefiniowany i logiczny wspólny mianownik. Uważam, że czynnik ten w połączeniu z wysoką jakością opisanych badań naukowych powoduje, że recenzowany cykl prac zdecydowanie spełnia wszystkie ustawowe warunki i może być podstawą do wszczęcia procedury nadania doktorowi Piotrowi Trochowi stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Leszek Jurczyk



