

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

Recenzja rozprawy doktorskiej
magistra inżyniera Damiana Tomaszewskiego
pt. *"Rozdzielanie i detekcja kwantowego splątania par Coopera"*

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pana magistra inżyniera Damiana Tomaszewskiego składa się z ośmiu rozdziałów, dwu dodatków, opatrzona jest też wstępem, podsumowaniem oraz bibliografią. Praca liczy 147 stron, zawiera blisko 50 rysunków i diagramów, w większości kolorowych. Badania naukowe, które stały się podstawą złożonej pracy, prowadzone były w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu, pod kierunkiem prof. dr hab. Jana Martinka i były to badania w całości teoretyczne. Układ pracy jest poprawny, a wywód poprowadzono w sposób logiczny. Dwa pierwsze rozdziały poświęcono ogólnemu wprowadzeniu w fizykę badanych zjawisk. W rozdziałach tych przedstawiono teorię BCS nadprzewodnictwa, elementarne pojęcia z zakresu przetwarzania kwantowej informacji oraz dokonano krótkiego przeglądu eksperymentów świadczących o możliwości przestrzennej separacji par Coopera z zachowaniem kwantowego charakteru tworzących ją elektronów.

Po wstępnych rozdziałach pracy, wprowadzających niezbędne pojęcia, następują dwa bloki tematyczne, dotyczące badań własnych autora. W rozdziałach III-VI analizowane są różne konfiguracje układu, w którym dochodzi do separacji par Coopera, natomiast rozdziały VII i VIII poświęcono analizie pomiarów pozwalających udokumentować występowanie stanów splątanych.

Przy obcowaniu z pracą zwraca uwagę staranność edytorska autora. Numeracja rozdziałów i podrozdziałów jest dobrze przemyślana, ich zawartość treściowa została podzielona w sposób zrównoważony. Zamieszczone diagramy i wykresy są bardzo czytelne, estetyczne i dopracowane. Chciałbym też podkreślić staranną edycję zamieszczonych wzorów, oznaczeń i numeracji równań. Język pracy jest komunikatywny, czyta się ją płynnie, potknięcia stylistyczne autora są bardzo

nieliczne, nie razi też nadmiar skrótów myślowych czy żargonu.

Cennym elementem kompozycji pracy jest to, że każdy rozdział opatrzony został podsumowaniem, które jest informatywne i wyczerpujące. Jednocześnie, dość rażąco jest brak dyskusji motywacji fizycznej badań podjętych w kolejnych rozdziałach, autor nie zadbał o zwrócenie uwagi na zjawiska i zakresy parametrów, które zamierza rozpatrywać.

Przykładowo we wprowadzeniu do rozdziału III pojawiają się, bez wcześniejszego przygotowania, pojęcia tunelowania sekwencyjnego i współ-tunelowania. Autor nie podaje zakresu parametrycznego występowania tych zjawisk, ani nie zamieszcza odnośnika literaturowego. Czytelnik nie otrzyma też żadnej dyskusji motywacji fizycznej ilustrującej, czemu taki zakres parametryczny miałby być interesujący. Podobnie, w tym samym wstępie pojawia się bez podania dodatkowych wyjaśnień układ szeregowy podwójnej kropki kwantowej w konfiguracji nadprzewodnik—podwójna kropka – nadprzewodnik, podczas gdy w poprzednim rozdziale przytaczano wyniki eksperymentów w złączu nadprzewodnik—podwójna kropka—dwie elektrody metaliczne.

Kolejny, IV-ty rozdział pracy wydaje się już być zupełnie pozbawiony paragrafu wstępnego. Poniżej tytułu „lokalne i nielocalne efekty interferencyjne w złączu Josephsona” następuje ogólny opis efektu Aharonowa-Bohm i Aharon-Cashera, a następnie podrozdział wprowadzający oddziaływanie spin-orbita. Autor w jawny sposób nie nawiązuje do tytułu rozdziału ani nie wyjaśnia roli, jaką w badanym układzie będzie przypisywał uwzględnieniu tych zjawisk.

Rozdział VI-ty otwiera stwierdzenie „drugim analizowanym układem jest...” przy czym autor nie wyjaśnia jaka konfiguracja stanowiła układ „pierwszy”: ta z rozdziału II-go, III-ciego czy IV-tego? Tym bardziej nie znajdziemy we wstępie do tego rozdziału uzasadnienia dlaczego kolejna rozpatrywana konfiguracja miałaby być interesująca.

Nie przeciągając już więcej szczegółowego wyliczenia chcę podkreślić, że tego typu uchybień w pracy jest wiele, przy czym z pewnością autor mógł ich uniknąć i byłby w stanie je poprawić przy bardziej krytycznym podejściu do tekstu przedłożonej rozprawy.

W podobnym nurcie mogę sformułować ocenę, że autor często nie dba o spójność prezentacji pomiędzy rozdziałami i odwoływanie się do wcześniejszych wyników. Za przykład niech posłuży wzmiankowane przez autora zjawisko rezonansu, do którego autor odnosi się w wielu miejscach pracy np. w rozdz. II pod równaniem (2.42), w paragrafie pod równaniem (3.42), czy w dyskusji poniżej równania (5.10). Nigdzie w pracy to zjawisko nie zostało jawnie wprowadzone, nie przedyskutowano parametrycznych warunków wystąpienia rezonansu i jego konsekwencji, kolejne wzmianki nie odsyłają do poprzednich rozważań.

Kolejnym zarzutem, który formułuję na podstawie licznych przykładów znalezionych w przedstawionej pracy, jest pewna beztroska okazana w rozgraniczaniu tych wyników, które zostały uzyskane przez autora bądź w jego grupie badawczej a tymi, które znane już były z literatury. Autor prześlizguje się kilkakrotnie przy pomocy ogólnikowych stwierdzeń: „analizowane w świecie zarówno teoretycznie, jak i eksperymentalnie” (wstęp rozdz. VI) czy „jest on (interferometr) często analizowany w literaturze” (rozdz. 4.3), które wymagałyby rozwinięcia lub uszczegółowienia. Z drugiej strony, odnajduję w tekście szczegółowe wyniki np. równania (4.27) do (4.32), których prezentacja sugeruje ich oryginalność (nie są opatrzone donosińnikiem do literatury), a które w bardzo podobnej postaci można znaleźć np. w pracy [70] (numeracja wg. bibliografii autora). Podobnie, bez odnośników literaturowych pozostawiony jest wynik (3.45), powtórzony zresztą w (3.49), dotyczący dość zaskakującego przesunięcia o fazę π prądu w złączu Josephsona. Oczekiwałbym tutaj podkreślenia, w jakim stopniu jest to nowy wynik autora (np. w tym konkretnym układzie, czy granicy) a w jakim ujęciu został już wyprowadzony w literaturze. Dobrze byłoby, gdyby autor uzmysłowił sobie, że wyraźne podkreślanie własnych wyników (choćby częściowych, cząstkowych, przyczynkowych) i przy tym oddanie sprawiedliwości innym badaczom znacząco podnosi jakość rozprawy i nadaje jej rysu rzetelności naukowej.

Dyskutując stopień nowości i wagę uzyskanych w pracy wyników nie sposób nie odnieść się do tych osiągnięć publikacyjnych autora, na których bazuje przedstawiona rozprawa.

Kandydat do stopnia doktorskiego jest, w chwili pisania tej recenzji, współautorem czterech artykułów naukowych. Pierwsza z opublikowanych prac pochodzi z doskonałego czasopisma ACS NANO, p. Tomaszewski jest drugim autorem, jednak wydaje się, że materiał badań opublikowanych w tej

pracy nie wchodzi bezpośrednio do tematyki przedstawionej rozprawy. Kolejna praca, opublikowana w Phys. Rev. B powstała w szerszej współpracy sześciu autorów, kandydat jest z kolei czwarty na ich liście. Jest to ważna i dobra praca, wyniki w niej zaprezentowane korespondują z rozdz. VII przedstawionej rozprawy. Dwie prace, również wielo-autorskie, opublikowane zostały w Acta Physica Polonica, tutaj młodszy koledzy z grupy ubiegli kandydata na pierwszych miejscach listy autorów, co budzi pewien mój niepokój. Prace z Acta Physica Polonica stanowią podstawę rozdz. VIII i częściowo rozdz. VII przedłożonej rozprawy. Niewątpliwie współautorstwo czterech publikacji oznacza osiągnięcie solidnych rezultatów naukowych, dokumentuje uczestnictwo w nowatorskich badaniach i świadczy o nabraniu wystarczającego doświadczenia do ubiegania się o stopień doktora.

Po bliższym zapoznaniu się z tekstem rozprawy stwierdzam, że rozdz. III, IV, V oraz VI zawierają liczne odniesienia do nieopublikowanych, ale zamieszczonych w spisie literatury dwu prac [62] „*Superconducting proximity effect and Cooper pair splitting in double quantum dot in cotunneling regime*”

oraz

[79] „*Combined Aharonov-Bohm and Aharonov-Casher effect on Josephson current*”, których pierwszym autorem miałby być kandydat. Niestety, prace te nie są nadal dostępne ani w czasopiśmie, ani nie zostały umieszczone w bazie preprintów. Recenzent napotyka zatem znaczną trudność oceny tekstu opartego na odnośnikach do literatury *de facto* nieistniejącej.

Zdaję sobie sprawę, że posiadanie pracy opublikowanej, w której liście autorów doktorant występuje na pozycji wyraźnie wskazującej, że praca dotyczy w przeważającej mierze jego własnego wkładu, opracowanego przez niego projektu, nie jest koniecznym wymaganiem. Zwyczajowo utarło się, że doktorant teoretyczny powinien wylegitymować się przynajmniej jednym takim osiągnięciem. Jest ze wszech miar wskazane, ze względów dydaktycznych, aby kandydat na doktora doprowadził prowadzone badania do końca, do przedstawienia w formie artykułu. Proces pisanie pracy do czasopisma stanowi ważną część wykształcenia fizyka teoretyka. Być może nie dopełnienie tego wymogu jest przeoczeniem, jednak wyraźnie obniża moją ocenę jakości przedstawionych badań i nie pozwala na sformułowanie bardzo dobrej oceny całości pracy.

W moim przekonaniu mocną stroną przedstawionej rozprawy jest nowoczesna tematyka, wybór

ambitnych zagadnień i szeroki zakres podjętych badań. Warto zwrócić uwagę, że zaledwie tydzień temu ukazała się w Phys. Rev. Lett. (PRL 115, 227003 G. Fulop et al.) praca eksperymentalna dotycząca sterowania kwantową interferencją elektronów emitowanych w urządzeniu nano-elektronicznym, służącym do rozszczepiania par Coopera. Eksperyment ten jest osnuty na tych samych wiodących tematach badawczych, co przedstawiona rozprawa, autorzy eksperymentu cytują też artykuł [104] należący do dorobku kandydata.

Wracając do samej rozprawy, pojęcia kluczowe dla zrozumienia fizyki omawianych urządzeń tj. takich, które dają możliwość uzyskiwania singletowych, koherentnych par elektronów, zostały przedstawione w rozdziale II-gim. Ważnym motywem jest wprowadzenie tzw. układu podwójnej kropki kwantowej, w którym każda z kropek pary dostrojona jest do reżimu kwantowej blokady kulombowskiej. Bliskość nadprzewodnika pozwala na wstrzykiwanie koherentnych par Coopera do tego układu, o ile odległość między kropkami pozostaje mniejsza od długości koherencji w nadprzewodniku. Okazuje się, że konieczne jest uwzględnienie oddziaływania na poszczególnych kropkach, tylko dzięki niemu wyklucza się umieszczenie singletu na pojedynczym stanie kwantowym kropki, w naturalny sposób oczekując rozdzielania elektronów. Autor przytacza prace eksperymentalne, wykazujące nielokalne charakterystyki prądowe przypisywane rozdzielaniu par, przy czym pierwszy udany eksperyment tego typu pochodzi zaledwie z 2009 roku.

W rozdziale III autor poszukuje rozwiązania na prąd Josephsona w zmodyfikowanym złączu SNS (nadprzewodnik – metal – nadprzewodnik), gdzie N zawiera dwie kropki w konfiguracji równoległej. Wprowadzona zostaje teoretyczna technika rachunkowa, oparta o czwarty rząd rozwinięcia, który w tej konfiguracji jest jednocześnie najniższym rzędem dającym wkład do prądu. W rozdziale III podano też kombinatoryczne diagramy wirtualnych przeskoków elektronów dla procesów, które dają wkład do prądu Josephsona. W takim uproszczonym podejściu możliwe jest podanie i przeanalizowanie wkładów od procesów rozdzielających i nierozdzielających pary elektronów oraz zdefiniowanie względnej efektywności rozdzielania par w badanym układzie.

Nieco bardziej złożona, ale też bardziej interesująca tematyka badania faz kwantowych i interferencji powstających w układzie koherentnym wprowadzona zostaje w kolejnym, IV-tym rozdziale pracy. Autor nadal bada złącze SNS z szeregową konfiguracją dwu kropek, nowością jest dopuszczenie

możliwości różnicy fazy dla tunelujących elektronów, związanej z wprowadzeniem strumienia pola magnetycznego przenikającego układ oraz tzw. fazy Aharonova-Casherera związanej z oddziaływaniami spinowo-orbitalnymi. Przeanalizowany jest model, w którym kropkami kwantowe zostały umieszczone w ramionach układu oraz, dla porównania, autor rozpatruje idealny pierścień metaliczny umieszczony w ich miejsce. Obliczone wielkości to, podobnie jak w poprzednim rozdziale, prąd Josephsona w czwartym rzędzie rachunku zaburzeń.

Rozdział V poświęcony jest bliższemu przyjrzeniu się stanowi podstawowemu dwu kropek, umieszczonych w konfiguracji równoległej tak jak poprzednio, w bliskości nadprzewodnika. Ze względu na wykluczenie stanów podwójnie obsadzonych na kropce (w granicy silnych oddziaływań), poprzez efekt bliskości z elektrodą nadprzewodzącą indukowane jest oddziaływanie magnetyczne pomiędzy kropkami, przyjmujące postać efektywnego oddziaływania wymiany. Metodologia rachunkowa jest podobna, obliczono poprawki do czwartego rzędu w rachunku zaburzeń. Rozdział kończy się interesującą uwagą o możliwości wystąpienia podstawowego stanu trypletowego kontrolowanego za pomocą różnicy fazy indukowanej oddziaływaniem spinowo-orbitalnym.

W rozdziale VI autor powraca do analizy złącza SN, które lepiej ilustruje konfigurację urządzeń stosowanych w pracach eksperymentalnych. Kropki nadal umieszczone są w geometrii równoległej, tym razem jednak rozdzielone elektrony dają wkład do prądu mierzonego w normalnych (metalicznych) doprowadzeniach. W ramach prowadzonych rachunków i przybliżeń autor identyfikuje efektywność rozdzielania par Coopera poprzez stosunek przewodności złącza SN obliczanej dla procesów rozdzielających pary do całkowitej przewodności tego układu.

Podsumowując, rozdziały III do VI stanowią pewien zwarty, zamknięty i wyczerpująco przeanalizowany program badawczy. Dobrze wyzyskane zostały możliwości zaproponowanego podejścia rachunkowego, zwraca też uwagę wysoka pracochłonność przeprowadzonych rachunków. Brakuje jednak wniosków uniwersalnych, dotyczących mierzalnych konsekwencji rozdzielania par Coopera, a nie tylko wielkości zdefiniowanych w ramach pewnego rachunku. Brakuje mi przedstawienia uzyskanych rezultatów w takich kategoriach, w jakich byłby wykonywany eksperyment, nawet przy daleko idącej idealizacji poczynionych założeń. Autor nie określa jaką wielkość można zmierzyć i przy pomocy jakiej zależności parametrycznej (np. fazy pola

magnetycznego) można określić postulowaną efektywność rozdzielania par.

W eksperymentach (np. tych omawianych w rozdz. II) elektrony tunelują przez kropkę do dwu rozsuniętych elektrod, umieszczonych w konfiguracji T-złącza. Można więc mówić o faktycznej, fizycznej separacji pary Coopera. Słabością merytoryczną układu zaproponowanego przez autora (rozdz. III i IV) jest to, że elektrony tunelują przez kropki do kolejnej elektrody, rozdzielenie ma miejsce tylko na kropkach, ale już nie w elektrodach. W geometrii takiej dopuszczalne jest również bezpośrednie tunelowanie z pominięciem ~~bez~~ kropek. Procesy bezpośredniego tunelowania mogą być trudne do praktycznego wyeliminowania w eksperymencie, a nie zostały ujęte w zaproponowanym modelu. Ponadto, wszystkie przedstawione rozważania dotyczą pary rozdzielonej co prawda, ale tylko wirtualnie, w formalnym opisie czwartego rzędu rachunku zaburzeń. Budzi moje wątpliwości to, że wprowadzona definicja rozdzielania (także ta z rozdz. VI) jest przywiązana do danego rzędu rachunku zaburzeń (np. w ósmym rzędzie procesy rozdzielania i nie-rozdzielania będą „wymieszane”), nie przedyskutowano możliwości operacyjnego sformułowania (zmierzenia) rozdziału pary bez odniesienia do wydzielonych wyrazów rachunku. Zastosowanie geometrii z pierścieniem – wprowadzonej w rozdz. IV-tym, dawało szansę na porównanie rozwiązania nieperturbacyjnego (podanego w pracy [70]) z perturbacyjnym rezultatem (4.34), czego autor jednak nie wykorzystał.

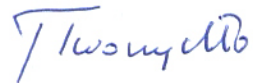
Rozdziały VII i VIII bazują na nieco innej konstrukcji koncepcyjnej. Przyjmuje się w nich, że zostały już przygotowane dwa elektrony w stanie spinowo splątany, przy czym zakłada się, że każdy z elektronów obsadza pojedynczy stan kwantowy. Siłą tego formalizmu jest ogólność sformułowania i pewna uniwersalność wyciągniętych wniosków (np. dotyczących sprawności detektorów czy źródeł). Stosuje się formalizm tzw. świadka splątania, oparty w badanych układach na pomiarach korelacji prądowych. Przytoczone są spójne i eleganckie argumenty wyznaczające granice jakości detektora i czystości stanu uzyskanego z rozdzielania tak, aby splątanie i naruszenie nierówności CHSH mogło być empirycznie potwierdzone. Zastosowano też pewien model fenomenologiczny, mogący być pomocny w bardzo konkretnym modelowaniu dekoherencji pary splątanych i rozdzielonych elektronów np. w elektrodach metalicznych.

Całość przeprowadzonych w rozprawie obliczeń i powiązanych z nimi ciągów rozumowań pokazują, że autor rozumie podstawy fizyczne badanych zjawisk, potrafi uzyskać na drodze formalnej

interesujące wyniki, a także przedstawić ich wyczerpującą analizę. Praca zawiera też dobry opis ogólny zjawisk zachodzących w badanych układach, zarówno na poziomie kompendium podręcznikowego, fragmentów o charakterze przeglądu literatury, jak również obszarów nowych, podlegających współczesnym badaniom fizyki teoretycznej nano-układów elektronicznych z uwzględnieniem zjawisk kwantowej koherencji.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu.

Warszawa, 2.12.2015 r.

Handwritten signature in blue ink, appearing to read "T. Tworzydło".