



Wrocław, 31.08.2022

Prof. dr hab. Maciej Maśka
Katedra Fizyki Teoretycznej
Wydział Podstawowych Problemów Fizyki
Politechnika Wroclawska

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. Bartłomieja Barana p.t.:

Dynamical properties of superconducting nanostructures

Recenzowana rozprawa doktorska łączy w sobie dwa aktualne obszary badawcze fizyki materii skondensowanej, a mianowicie fizykę układów w skali nano oraz fizykę stanów nierównowagowych. Jest to praca teoretyczna, w ramach której badania prowadzone były głównie z wykorzystaniem formalizmu opartej na funkcji Greena oraz teorii Floquet. Praca została wykonana pod opieką prof. Tadeusza Domańskiego w Katedrze Fizyki Teoretycznej Wydziału Matematyki, Fizyki i Informatyki UMCS.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim, składa się na nią siedem rozdziałów, wliczając w to motywację, wprowadzenie do nadprzewodnictwa oraz podsumowanie i perspektywy dalszych badań. Główne części pracy to opis dynamiki stanów Andreeva w pojedynczej kropce kwantowej, opis kropki z periodycznym wymuszeniem oraz opis dynamiki stanów Andreeva w układzie opartym o podwójną kropkę kwantową. Jest też krótki rozdział poświęcony wykorzystaniu metod nauczania maszynowego do badania nierównowagowego zachowania podwójnej kropki. Zasadnicza część pracy ma niecałe 120 stron, po których następuje 9 dodatków prezentujących szczegóły techniczne wykonywanych obliczeń. Całość kończy lista pięciu prac opublikowanych przez doktoranta oraz licząca 161 pozycji bibliografia.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Recenzję rozpocznę od przeglądu zawartości poszczególnych rozdziałów rozprawy. Pierwszy rozdział (*Motivation*) jest w zasadzie ogólnym wprowadzeniem do nanoukładów i zjawisk w nich zachodzących. Zawiera informacje literaturowe dobrze dobrane do zasadniczej tematyki rozprawy, czyli do tego, co jest prezentowane w kolejnych rozdziałach. Dlatego z powodzeniem mógłby być zatytułowany *Introduction*. W przypadku *Motivation*, można by się spodziewać położenia nieco większego nacisku na hipotezy badawcze i pytania, na które rozprawa stara się odpowiedzieć.

Drugi rozdział (*Introduction to superconductivity*) to typowe „książkowe” wprowadzenie do klasycznego (konwencjonalnego) nadprzewodnictwa, a więc opis samego zjawiska oraz tłumaczącej go teorii Bardeena–Coopera–Schrieffer’a (BCS). Pierwsza część rozdziału jest bardzo ogólna i przedstawia materiał dobrze znany. Ze względu na jej dydaktyczny charakter pewnie byłoby dobrze nie pozostawiać stwierdzeń i wyników bez podania ich źródła [przykładowo, wzory (2.40) oraz (2.41)]. Druga część rozdziału (podrozdział 2.3) poświęcona jest już zjawiskom blisko związanym z badaniami prowadzonymi w ramach pracy doktorskiej. Jest tam ładny opis efektu bliskości oraz odbicia Andreeva, czyli zjawisk, które będą się przewijały przez całą rozprawę.

Rozdział trzeci (*Dynamics of Andreev states in single quantum dot system*) rozpoczyna prezentację oryginalnych wyników doktoranta. W szczególności poświęcony jest on badaniu dynamiki układu złożonego z kropki kwantowej podłączonej do jednej elektrody nadprzewodzącej i jednej metalicznej. Wyjściowy hamiltonian układu zawiera wyrazy opisujące te trzy elementy składowe oraz wyrazy opisujące oddziaływanie pomiędzy kropką a poszczególnymi elektrodami. Kropka kwantowa zawiera jeden stan atomowy, na którym elektrony oddziałują oddziaływaniem kulombowskim. Elektroda metaliczna to swobodny gaz elektronowy opisany w przestrzeni pędów. W przypadku elektrody nadprzewodzącej jest to ten sam hamiltonian wzbogacony o wyraz typu BCS, opisujący singletowe parowanie w przestrzeni pędów. Sprzężenia kropki z oboma elektrodami mają tę samą formę hybrydyzacji pomiędzy stanami pędowymi elektrod i stanem zlokalizowanym



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekani.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



w kropce, przy czym oczywiście siły sprzężenia z poszczególnymi elektrodami mogą być różne. Następnie hamiltonian ten jest przybliżany przez przejście do granicy nieskończonej szczeliny wynikającej z parowania. W efekcie wyrazy opisujące skorelowaną kropkę, elektrodę nadprzewodzącą oraz sprzężenie pomiędzy tymi elementami zastępowane są efektywnym hamiltonianem kropki, w której prócz korelacji kulombowskich występuje zaindukowane efektem bliskości singletowe parowanie w przestrzeni rzeczywistej. Przybliżenie to chyba w niezbyt precyzyjny sposób doktorant opisuje jako odcałkowanie fermionowych stopni swobody - przecież ten efektywny hamiltonian wyrażony jest także operatorami fermionowymi, tyle że kreującymi i anihilującymi stany zlokalizowane w kropce. Ponadto, ponieważ ten efektywny hamiltonian będzie używany dalej w rozprawie, może warto było trochę więcej napisać o tym przybliżeniu, tzn. w jaki sposób otrzymuje się postać ze wzoru (3.7) oraz w jakim zakresie parametrów to przybliżenie daje wiarygodne wyniki.

Kolejny podrozdział poświęcony jest przykładowym realizacjom eksperymentalnym badanego w tym rozdziale układu. Następnie doktorant wyprowadza równania opisujące dynamikę układu. W szczególności z równań ruchu wyznaczony jest wzór na czasową zależność prądu płynącego pomiędzy kropką a elektrodą metaliczną. Z kolei prąd płynący przez elektrodę nadprzewodzącą oraz obsadzenie kropki obliczane są z równania ciągłości. W kolejnych podrozdziałach badane są te prądy w przypadku różnych czasowych zaburzeń układu. I tak w podrozdziale 3.4 zaburzenie polega na włączeniu sprzężenia pomiędzy kropką a elektrodami, w 3.5 zmieniana jest wartość potencjału chemicznego elektrody metalicznej, w 3.6 przesuwany poziom atomowy w kropce, a w 3.7 dołączana jest elektroda nadprzewodząca. Wykresy 3.3 do 3.13 pokazują otrzymane czasowe zależności prądów, obsadzeń czy konduktancji w różnych reżimach parametrów. Widać tam oscylacje kwantowe oraz obwiednię ilustrującą eksponencjalne osiągnięcie stanu równowagowego. Szkoda, że wykresy nie mają jednolitej formy opisu osi, tj. liniowe wykresy dwuwymiarowe mają na osi poziomej czas t (w jakich jednostkach?), natomiast wykresy przedstawiające zależności od dwóch wielkości (typu *heat map*) mają



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
http://wppt.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



$2t\Gamma_N$. Rozdział kończy podsumowanie w syntetyczny sposób zbierające zaprezentowane wyniki otrzymane dla w różny sposób zaburzanego układu.

W odróżnieniu od rozdziału trzeciego, gdzie zaburzenie było typu *quench*, czyli w postaci pojedynczej zmiany parametrów, w rozdziale czwartym (*Periodically driven quantum dot*) jeden z parametrów układu zmieniają się w sposób periodyczny. Tym parametrem jest poziom atomowy kropki, czyli wielkość którą chyba najłatwiej eksperymentalnie kontrolować w badanym układzie. Rozdział rozpoczyna się krótką prezentacją teorii Floquet'a, opisującej rozwiązania hamiltonianu periodycznie zależnego od czasu. Ponieważ własności kropki sprzężonej z elektrodami badane są przy pomocy formalizmu funkcji Greena, w podrozdziale 4.2 oba te podejścia zostały połączone, co pozwoliło wyprowadzić, podobnie jak w poprzednim rozdziale, wzór na prąd płynący w elektrodzie metalicznej. Oczywiście ze względu na periodyczny charakter wymuszenia w tym wypadku badana jest nie tylko czasowa zależność tego prądu, ale także jego średnia wartość. Wyliczane są także inne średnie wartości, jak na przykład konduktancja, funkcja spektralna kropki (którą raczej nazwałbym gęstością stanów, ze względu na brak zależności od pędu) czy wielkość indukowanego efektem bliskości nadprzewodzącego parametru porządku w kropce. Średnie te są obliczane w funkcji amplitudy oraz częstotliwości wymuszenia.

Rozdział piąty (*Dynamics of Andreev states in double quantum dot system*) jest krokiem w stronę bardziej złożonych układów, gdzie pojedyncza kropka kwantowa zastąpiona jest kropką podwójną. W efekcie układ sprzężony z elektrodami nie jest już opisywany pojedynczym poziomem atomowym, a zawiera pełny hamiltonian typu Hubbarda dla dimera. Innymi słowy, dochodzi energia przeskoku elektronów pomiędzy kropkami. Zasięg oddziaływania kulombowskiego w dalszym ciągu ograniczony jest do poszczególnych kropek, a poziomy atomowe kropek są takie same. Następnie hamiltonian przybliżony jest na poziomie średniego pola. Podobnie jak w przypadku pojedynczej kropki, przedstawiona jest – tym razem znacznie krócej – możliwość eksperymentalnej realizacji takiego układu. Zaburzenie jest, podobnie jak w rozdziale trzecim, jednokrotną zmianą parametrów układu



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234
Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
http://wppt.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



a zaprezentowane wyniki są odpowiednikami tych, które zostały pokazane w rozdziale trzecim dla pojedynczej kropki. Wyniki te pokazują, że sprzężenie między kropkami wprowadza nową skalę czasu objawiającą się dodatkowymi szybkimi oscylacjami prądu. Pokazano tam też, że w reżimie słabych korelacji oddziaływanie na poszczególnych kropkach w niewielkim stopniu modyfikuje ewolucję układu po zaburzeniu. Ciekawe, czy jest to prawdą także w obecności oddziaływania pomiędzy kropkami?

W dalszej części rozdziału (podrozdział 5.6) analizowany jest także przypadek wymuszenia periodycznego, podobnie jak w rozdziale czwartym. Prócz czasowej zależności prądów obliczane i prezentowane są tu przede wszystkim uśrednione wartości konduktancji. Badany układ jest już na tyle skomplikowany, że można by się pokusić o zbadanie możliwości wystąpienia innych, nietrywialnych zjawisk. Przykładowo, czy gdyby zrezygnować z założenia o równych poziomach atomowych obu kropek, można by wymusić pompowanie ładunku? Jest to pytanie o tyle ciekawe, że w pompach opartych o podwójną kropkę kwantową zakłada się metaliczne rezerwuary. Tu nowością byłaby elektroda nadprzewodząca. Z jednej strony nie można wykluczyć, że szczelina nadprzewodząca uniemożliwiłaby pompowanie. Ale z drugiej, być może można by wykorzystać odbicie Andreeva? Oczywiście to tylko daleko posunięte spekulacje.

Ostatni z rozdziałów prezentujących wyniki uzyskane przez doktoranta (rozdział 6, *Machine learning simulations*), poświęcony jest zupełnie innemu podejściu do problemu analizy zależnych od czasu układów. Rozwiązanie równań ruchu dla układu dwóch kropek zostało „zlecone” sieci neuronowej. Dzięki twierdzeniu, które gwarantuje, że dostatecznie skomplikowana sieć jest w stanie z dowolną dokładnością przybliżyć każdą funkcję, doktorant skonstruował gęsto połączoną sieć, która na wejściu otrzymywała amplitudę zaburzenia, wielkość sprzężenia pomiędzy kropkami, częstość oraz napięcie pomiędzy źródłem a drenem, a na wyjściu powinna pojawić się odpowiadająca tym parametrom konduktancja. Sieć była trenowana tak, żeby wyjściowa konduktancja była maksymalnie zbliżona do otrzymanej z równań ruchu dla wejściowych parametrów. Otrzymane



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



wyniki wydają się dobrze odtwarzać rozwiązanie dokładne, choć z powodu dość skromnego opisu użytego podejścia, trudno ocenić rzeczywistą użyteczność tej metody. Przykładowo, w rozprawie napisane jest, że pozwoliła ona na skrócenie czasu obliczeń z ponad tygodnia do godziny? Czy ta godzina obejmowała także trening sieci, czy tylko czas wyznaczania konduktancji przez już wytrenowaną sieć? W pracy pokazane są wyniki uzyskane dla danych, które nie były użyte do treningu. Pojawia się pytanie, jak daleko były dane treningowe odległe od danych obliczanych? Czy sieć była jednokrotnie wytrenowana, a następnie używana dla dowolnych wartości parametrów wejściowych? Jaki wyglądał zestaw danych treningowych? Czy to był ciąg regularnie rozłożonych wartości amplitudy, częstości, itd., czy to były losowe punkty? Mam nadzieję, że doktorant w trakcie obrony uzupełni te informacje.

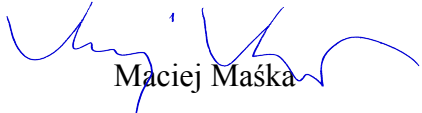
Rozprawę kończy podsumowanie oraz bardzo użyteczne dodatki, wyjaśniające techniczne szczegóły wykonanych obliczeń. Jest także lista publikacji, w których doktorant jest współautorem. Jest bardzo dobry dorobek, obejmujący m.in. trzy publikacje w *Physical Review B*.

Podsumowując stwierdzam, że zaprezentowane w rozprawie pana mgr. Bartłomieja Barana wyniki stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, tym samym rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym*. Jednocześnie wnoszą o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH




Maciej Maśka

Politechnika Wroclawska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434