

Warszawa, 22-go sierpnia 2022r.

Prof. dr hab. Piotr Magierski  
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej  
ul. Koszykowa 75, 00-667 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Bartłomieja Barana  
pt: Dynamiczne właściwości nadprzewodzących nanoukładów.**

Praca doktorska mgr. Bartłomieja Barana jest poświęcona badaniom teoretycznym dotyczącym nierównowagowych zjawisk w nanoukładach, których głównym elementem jest kropka kwantowa. Rozprawa została oparta na wynikach opublikowanych w pięciu artykułach w czasopismach recenzowanych: w Scientific Reports (jedna praca), Physical Review B (trzy prace) oraz Acta Physica Polonica A (jedna praca). Artykuły posiadają od dwóch do pięciu autorów. Mgr Bartłomiej Baran jest pierwszym autorem w trzech opublikowanych pracach, z czego w dwóch z nich wyraźnie złamany został porządek alfabetyczny autorów, co wskazuje, że wkład mgr. Barana w otrzymane wyniki był dominujący.

Rozprawa doktorska składa się z wprowadzenia, sześciu rozdziałów oraz podsumowania. Ponadto do pracy dołączony został obszerny dodatek omawiający zastosowane techniki teoretyczne. We wprowadzeniu autor przedstawia motywację stojącą za badaniami stanowiącymi przedmiot pracy doktorskiej. Autor argumentuje dlaczego skupił się na układach złożonych z jednej i dwóch kropek kwantowych sprzężonych z nadprzewodnikiem, oraz z normalnym metalem. Przedstawia panoramę badań nanoukładów, co pozwala umiejscowić wyniki rozprawy doktorskiej w szerszym kontekście dotychczasowych dokonań teoretycznych i eksperymentalnych.

Rozdział drugi stanowi omówienie głównych aspektów teorii nadprzewodnictwa, które mają znaczenie dla badanych układów. W szczególności, autor przedstawił podstawowe wnioski z teorii BCS oraz opisał dokładnie własności stanów Andrejewa. Stany te odgrywają kluczową rolę w kropkach kwantowych połączonych z nadprzewodnikiem.

W rozdziale trzecim mgr Baran omówił zasadnicze cechy badanego modelu zawierającego jedną kropkę kwantową. Hamiltonian takiego układu zawiera część odpowiadającą kropce z oddziaływaniem odpychającym symulującym oddziaływanie kulombowskie. Ponadto układ zawiera nadprzewodnik o szczelinie energetycznej, która stanowi dominującą skalę energetyczną w rozważanym nanoukładzie, oraz normalny metal. Zarówno metal jak i nadprzewodnik są sprzężone z kropką przy pomocy stałych sprzężenia będących parametrami modelu. Wszystkie badania zostały przeprowadzone w temperaturze zerowej.

W dalszej części rozdziału autor przedstawił wyniki reakcji układu na gwałtowne zmiany warunków tj. zmianę energii stanu kwantowego w kropce, zmianę różnicy potencjału nadprzewodnik-metal, oraz zmianę sprzężenia z nadprzewodnikiem. Główną obserwacją był przepływ ładunku i różniczkowa konduktancja. Autor zauważył, że przepływ prądu może wykazywać oscylacje silnie związane z warunkami początkowymi. W szczególności, w przypadku początkowo nieobsadzonej kropki kwantowej prąd wykazuje oscylacje o okresie ściśle związanym z energią stanów Andrejewa. We wszystkich przypadkach prąd zanikał na skutek sprzężenia kropki kwantowej z metalem.

W następnym rozdziale mgr Bartłomiej Baran omówił reakcję układu, tj. kropki kwantowej sprzężonej z metalem i nadprzewodnikiem, na zaburzenia typu periodycznego. Do analizy autor wykorzystał metodę funkcji Greena i teorię Floqueta. Omówienie tego podejścia teoretycznego zostało zawarte w pierwszych dwóch podrozdziałach i dodatku A. Pozostałą część rozdziału stanowi opis wyników numerycznych. Ponownie autor skupił się na czasowej zależności prądu i

różniczkowej konduktancji w funkcji zarówno częstotliwości, jak i amplitudy zaburzenia. Zrozumienie zależności czasowych tych wielkości umożliwia analiza funkcji spektralnej. W szczególności zależność funkcji spektralnej od stosunku amplitudy zaburzenia do częstotliwości wykazuje jakościowo inne własności w obecności nadprzewodnika. W tym przypadku maksima funkcji spektralnej odpowiadające stanom Andrejewa rozszczepiają się, przy czym wielkość rozszczepienia rośnie z amplitudą zaburzenia. Dla porównania autor zamieścił wyniki dla układu metal-kropka-metal, w których ten efekt nie występuje.

Kolejny rozdział mgr Bartłomiej Baran poświęcił na omówienie efektów dynamicznych w bardziej skomplikowanym układzie, w którym jedną kropkę kwantową zastąpił dwiema sprzężonymi kropkami. Motywacja dla rozważań takiego układu jest związana z możliwością ich realizacji eksperymentalnej. Ponownie autor przeprowadził analizę reakcji układu tj. prądu i różniczkowej konduktancji na gwałtowną zmianę warunków początkowych. W szczególności przeprowadzona została analiza odpowiedzi układu na zmianę sprzężenia z nadprzewodnikiem i zmianę różnicy potencjału metal-nadprzewodnik. Wyniki przeprowadzono dla różnych natężeń oddziaływania kulombowskiego. Stwierdzono, że odpychanie kulombowskie osłabia zarówno efekt hybrydyzacji kropek, jak i efekt sprzężenia z nadprzewodnikiem, który jest odpowiedzialny za powstawanie stanów Andrejewa.

Analiza zależności czasowej prądu wykazała natomiast, że sprzężenie między kropkami powoduje generację dodatkowych oscylacji. Gwałtowna zmiana potencjału metal-nadprzewodnik indukuje oscylacje, które są superpozycją czterech częstości charakterystycznych. Dwie z nich mają źródło w sprzężeniu kropki z nadprzewodnikiem implikującym obecność stanów Andrejewa, podczas gdy następną dwiema są konsekwencją sprzężenia pomiędzy kropkami kwantowymi. Podobnie jak w przypadku pojedynczej kropki prąd jest tłumiony eksponencjalnie zależnie od wielkości sprzężenia z metalem.

Ostatni rozdział autor poświęcił na krótkie omówienie techniki tzw. uczenia maszynowego, która może być wykorzystana do badania dynamiki nanoukładów. Autor pokazał, że jest możliwe wykorzystanie tych technik do generacji, stosunkowo niewielkim kosztem, wyników dla innego zestawu parametrów modelu. Wydaje się, że może to zdecydowanie zmniejszyć czas generacji wyników i pomoże w systematycznej analizie tego typu układów.

W podsumowaniu mgr Bartłomiej Baran przedstawił m.in. perspektywy dalszych badań, które wydają się bardzo interesujące. Autor proponuje mianowicie zastosowanie wykorzystanych technik teoretycznych do analizy modów Majorany i rozważenia sieci kropek kwantowych sprzężonych z nadprzewodnikiem.

Praca jest napisana bardzo klarownie. Nie zauważyłem istotnych pomyłek. Rysunki zostały wykonane starannie i są czytelne, może z wyjątkiem rysunku 5.3, gdzie warto było użyć większej czcionki.

Wydaje mi się, że autor mógłby poświęcić trochę miejsca na analizę ograniczeń opisu nanoukładów, które zastosował. Takimi zagadnieniami, które są interesujące z mojego punktu widzenia, i na które nie znalazłem odpowiedzi w tekście są:

- wybór modelowego Hamiltonianu opisującego kropkę kwantową,
- ograniczenie się do przypadku temperatury  $T=0$ ,
- ograniczenie się do teorii średniego pola w opisie układu.

Uważam że rozprawa doktorska dokumentuje ciekawą pracę badawczą o dużym znaczeniu dla naszego rozumienia mechanizmów procesów nierównowagowych w nanostrukturach z wykorzystaniem nadprzewodników i kropek kwantowych. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



