



Instytut Fizyki Molekularnej PAN

ul. Mariana Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań

tel. 061 8695100, fax 061 8684524

Internet: <http://www.ifinpan.poznan.pl>

Poznań, 15 maja 2015

Dr hab. Piotr Stefański, prof. nadzw.

Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgra Jana Barańskiego pt. „Rola interferencji oraz korelacji elektronowych w układach kropek kwantowych sprzężonych z nadprzewodnikami”.

Rozprawa została wykonana w Zakładzie Teorii Fazy Skondensowanej na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu im. Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie pod opieką p. prof. dr hab. Tadeusza Domańskiego.

Praca składa się z trzech głównych Rozdziałów i dwóch Dodatków poprzedzonych krótkim Wprowadzeniem i zakończona Podsumowaniem. Praca liczy 136 stron i posiada 129 odnośników do literatury. W skład rozprawy doktorskiej wchodzi osiem opublikowanych prac i jedno doniesienie opublikowane na stronie arxiv.org. W ośmiu z tych prac Doktorant jest pierwszym autorem, z czego trzy z nich zostały opublikowane w wiodących czasopismach fizyki ciała stałego: dwie Physical Review B a jedna w Journal of Physics Condensed Matter. W powiązaniu z wysokim poziomem opisu wyników w Rozprawie, jest to w moim odczuciu, materiał w zupełności wystarczający dla potrzeb rozprawy doktorskiej. Praca napisana jest generalnie precyzyjnym językiem i tworzy pewien ciąg logiczny, dlatego dobrze się ją czyta. Czytelnik odnosi wrażenie że autor wykazuje biegłość w technikach obliczeniowych i dobrze rozumie wyniki które otrzymał.

Każdy rozdział poprzedzony jest krótkim wprowadzeniem omawiającym dane zjawisko fizyczne, rozważane później w kontekście kropki kwantowej sprzężonej z nadprzewodzącą elektrodą. Jest to dobrym pomysłem bo niejako przygotowuje czytelnika do późniejszej dyskusji wyników.

Wyniki wchodzące w skład Rozprawy wpisują się w dynamicznie rozwijający się nurt fizyki nanoskopowej, a w szczególności indukowanego nadprzewodnictwa w kropkach kwantowych i badań transportu elektrycznego przez takie heterostrukтуры. Doktorant skierował swoje zainteresowania na istotne zagadnienia, charakterystyczne dla takich nanoskopowych układów, a więc współzawodnictwo silnych korelacji elektronowych na kropce z korelacjami prowadzącymi do nadprzewodnictwa, rolę kwantowej interferencji oraz wpływ procesów dekoherencji indukowanych przez rezerwuary fermionowe i bozonowe. Badania teoretyczne przeprowadzone zostały w oparciu o formalizm funkcji Greena w obrazie stanów odbiciowych Andreeva pojawiających się na złączu między kropką kwantową elektrodą nadprzewodzącą.

Za najważniejsze wyniki Rozprawy uważam:

-opis koegzystencji silnych korelacji elektronowych na kropce z indukowanym w niej nadprzewodnictwem, manifestującą się obecnością stanów Andreeva i rezonansu Kondo w różniczkowym przewodnictwie w obrębie przerwy nadprzewodzącej,

-przeniesienie i opis zjawiska kwantowej interferencji w języku kwazicząstek w obrębie indukowanej przerwy nadprzewodzącej na kropce w obecności silnych korelacji elektronowych.

W pierwszym z głównych Rozdziałów Doktorant na wstępie omawia powstawanie odbiciowych stanów Andreeva dla kropki kwantowej zhybrydyzowanej z nadprzewodzącą elektrodą. Paradoksalnie, jest to najgorzej napisany fragment z ogólnych części wprowadzających dla poszczególnych rozdziałów. Wynika to prawdopodobnie z faktu że dla autora ten fragment opisu jest najbardziej oczywisty i najlepiej znany. Pojawiają się tutaj niejasne sformułowania jak „efekt bliskości” (miedzy czym, a czym ?) oraz żargonowe sformułowania wynikające z próby bezpośredniego tłumaczenia odpowiedniego tekstu angielskiego, jak: „stany podprzerwowe”, „sproksymizowana kropka”. Powtarzają się one również w dalszej części pracy. Wydaje się, że lepiej byłoby użyć bardziej opisowych sformułowań oraz przytoczyć bezpośrednio ich angielskie odpowiedniki. Również niezręczne określenie „retardowane” funkcje Greena powinno być zmienione na „opóźnione” jako dopełnienie do przedwczesnych funkcji Greena. Pragnę w tym miejscu podkreślić, że uwagi te i dalsze, dotyczące strony edytorskiej pracy nie umniejszają jej wartości merytorycznej. Dalej autor wprowadza funkcje Greena w formalizmie Nambu; użytecznym do opisu nadprzewodnictwa. We wzorze (2.1) (i również dalej we wzorze (2.29)) pojawiają się dwa błędy w zapisie elementów (2,1) i (2,2) w ogólnym opisie macierzy funkcji Greena. Wydaje się że są to tylko błędy edytorskie, jako że w dalszej części pracy przy konkretnych obliczeniach ten błąd już się nie powtarza. Autor uniknąłby tego błędu gdyby po kolei omówił sens fizyczny poszczególnych elementów macierzowych i ich roli w powstawaniu stanów Andreeva. Dalej Doktorant wprowadza model Andersona dla kropki kwantowej z jednym aktywnym poziomem, zhybrydyzowanej z elektrodą normalną i nadprzewodzącą, oraz rozważa przypadek bez oddziaływań kulombowskich na kropce. Autor pokazuje że na skutek sprzężenia kropki z elektrodą nadprzewodzącą wewnątrz przerwy nadprzewodzącej pojawiają się stany Andreeva i bada ich dynamikę w gęstości stanów kropki i przewodnictwie różniczkowym. W przybliżeniu nieskończenie szerokiej przerwy nadprzewodzącej Hamiltonian układu przyjmuje szczególnie prostą postać, a gęstość stanów kropki ma prostą interpretację fizyczną opisującą powstawanie stanów Andreeva. W tym przybliżeniu Doktorant również dyskutuje możliwość przejścia fazowego od magnetycznego dubletu do singletu w funkcji wielkości oddziaływania kulombowskiego na kropce w stosunku do szerokości przerwy nadprzewodzącej. Pokazuje również jak takie przejście manifestuje się w gęstości stanów kropki i przewodnictwie poprzez zmianę liczby stanów Andreeva. Ta wartościowa dyskusja jest poparta bliską relacją z najnowszymi faktami eksperymentalnymi.

Następnie autor przechodzi do zagadnienia współistnienia silnych korelacji elektronowych na kropce (efektu Kondo) i indukowanego porządku nadprzewodzącego, również w przybliżeniu nieskończonej przerwy nadprzewodzącej. W pierwszym przybliżeniu zakłada się że silne korelacje nie modyfikują pozadiagonalnych elementów macierzy energii własnej poziomu kropki, a następnie elementy niediagonalne określa się samozgodnie.

Elementy diagonalne z kolei zostały wyliczone metodą równań ruchu przy odpowiednim „rozszczeniu” funkcji Greena wyższych rzędów, aby otrzymać zamknięty układ równań. W mojej opinii brak tutaj komentarza dotyczącego zakresu stosowalności użytego podejścia i odnośników do literatury. W szczególności w jakiej relacji jest to podejście do powszechnie używanego przybliżenia Lacroix [C. Lacroix, J. of Phys. F: Metal Physics 11, 2389 (1981)], i co zmienia wprowadzenie rozkładów Fermiego-Diraca zamiast samozgodnego liczenia wartości średnich korelacji dla elektronów w elektrodach i między elektronem kropki a elektronem z elektrody.

Obliczenia gęstości stanów kropki i różniczkowego przewodnictwa Andreeva, przedstawione na rysunkach (2.16) i (2.17) pokazują, że pewnym przedziale parametrów możliwa jest koegzystencja rezonansu Kondo i stanów Andreeva. Uważam to za ważny i ciekawy wynik, dający interpretację dla wyników eksperymentalnych. W kontekście tych wyników byłby celowy krótki komentarz dotyczący relacji wielkości oddziaływania kulombowskiego U , użytego w obliczeniach, do indukowanej przerwy Δ_d i powiązania tego z wcześniejszą dyskusją przejścia fazowego.

Na stronie 20 autor pisze, że w przybliżeniu szerokiego pasma elektrod stałe sprzężenia V_k mogą być zastąpione energią własną Γ , co nie jest prawdą. Postać Γ wynika z obliczenia poszerzenia poziomu kropki w wyniku jego hybrydyzacji z elektrodą przy założeniu szerokiego pasma elektrody. Autor zresztą przytacza jej postać we wzorze (2.37). Nie zauważyłem również w tekście odnośnika do rys. 2.8.

W następnym Rozdziale Rozprawy autor koncentruje się na badaniach kwantowej interferencji w wyjściowym układzie kropki kwantowej sprzężonej z elektrodą normalną i nadprzewodzącą. Poprzez wprowadzenie dodatkowej kropki kwantowej sprzężonej równolegle z pierwotną autor wprowadza możliwość tunelowania elektronów poprzez dwa interferujące kanały przewodnictwa. W Rozdziale tym, oprócz ciekawych wyników, na uwagę zasługuje bardzo dobrze napisane wprowadzenie dotyczące rezonansu Fano, sugerujące dogłębne zrozumienie tego zjawiska przez autora. Brakuje mi tutaj tylko odnośnika do pracy przeglądowej dotyczącej efektu Fano w nanostrukturach: Miroshnichenko et.al. Rev. Mod. Physics, 82, 2257 (2010).

Autor zaczyna dyskusję od przypadku bez oddziaływań kulombowskich na kropkach i pokazuje, że zarówno w gęstości stanów pierwotnej kropki jak i w przewodnictwie Andreeva pojawiają się asymetryczne rezonanse Fano w obrębie przerwy nadprzewodzącej. Charakterystyczną cechą jest to że pojawiają się one parami, symetryczne względem poziomu Fermiego. Znamionuje to udział kwazicząstek w kwantowej interferencji, co autor szczegółowo omawia. Jako dopełnienie dyskusji przydałaby się tutaj analiza relacji znaku parametru asymetrii q ze sprzężeniem t między kropkami, w kontekście rysunków 3.7 i 3.11. Po analizie rys. 3.9 gęstości stanów kropki pobocznej nasuwa się pytanie: dlaczego poziom ε_2 ma skończoną szerokość dla $t=0$? Podobne pojawianie się rezonansów Fano, jak autor pokazuje, występuje dla silnie skorelowanej pierwotnej kropki. W szczególności dla poziomu ε_2 na poziomie Fermiego możliwe jest tłumienie rezonansu Kondo poprzez kwantową interferencję. Po uwzględnieniu korelacji elektronowych na kropce pobocznej pojawiają się dwa dodatkowe kwazicząstkowe rezonanse Fano rezultat interferencji ze stanem ładunkowym $\varepsilon_2 + U$. Ostatnia część Rozdziału poświęcona jest analizie wpływu procesów dekoherencji na rezonanse Fano wprowadzonych poprzez dołączenie dodatkowej elektrody do kropki

pobocznej. Ciekawym efektem jest tutaj pojawienie się rezonansu Kondo na tej kropce dla dużego jej sprzężenia z dodatkową elektrodą. Generuje on rezonans Fano w gęstości stanów kropki pierwotnej.

Niestety w tej części pojawiają się również żargonowe sformułowania jak „defazowanie”, „randomizacja”, „dekoherująca elektroda”. Z dalszych uwag edytorskich: na str. 73 w pierwszym zdaniu „macierz funkcji Greena” powinna być zastąpiona poprzez „macierz energii własnej”. Rys. 3.6 ma niekompletny podpis. Nie ma również odnośnika w tekście do rysunku 3.15.

W ostatnim rozdziale Rozprawy autor prezentuje wyniki dotyczące wpływu sprzężenia kropki kwantowej z polem fononowym na transport Andreeva poprzez badany układ. Szczegółowo omawiane jest rozseparowanie fermionowych i bozonowych stopni swobody i wynikającą z tego renormalizację poziomu kropki oraz oddziaływania kulombowskiego na kropce. Doktorant pokazuje, że w efekcie przesunięcia polaronowego oddziaływanie to może zostać zaniedbane w dalszych rozważaniach. Struktura energetyczna kropki zyskuje natomiast modulację z częstotliwością wzbudzenia fononowego. W rezultacie, w gęstości stanów kropki pojawiają się dodatkowe piki dające wkład do wielokrotnych odbić Andreeva widocznych w transporcie. Ciekawym efektem jest tutaj, wyjaśniony przez Doktoranta, wzrost tunelowania Andreeva pojawiający się dla napięcia odpowiadającego połowie częstości fononu, jako efekt przecinania się sąsiednich cząstkowych i dziurowych stanów Andreeva.

Wyniki pracy p. mgra Jana Barańskiego, jak i sposób napisania Rozprawy, mimo drobnych uchybień, oceniam bardzo wysoko. Świadczą one o bardzo dużej biegłości w posługiwaniu się formalizmem funkcji Greena jak i, tak potrzebnej fizykowi, wyobraźni nieodzownej przy interpretacji wyników. Przedstawione w Rozprawie rezultaty w sposób istotny poszerzają stan obecnej wiedzy na temat transportu w heterostrukturach z nadprzewodnikiem w obecności silnych korelacji elektronowych i kwantowej interferencji.

Podsumowując, stwierdzam że Rozprawa Doktorska p. mgra Jana Barańskiego spełnia wszystkie wymogi ustawowe i merytoryczne stawiane pracom doktorskim. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów związanych z tą rozprawą według obowiązującej ustawy.

Piotr Stefaniak