

Prof. dr hab. Maciej M. Maśka
Zakład Fizyki Teoretycznej
Instytut Fizyki
Uniwersytet Śląski

Katowice, 01.07.2015

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Jana Barańskiego p.t.:
**“Rola interferencji oraz korelacji elektronowych w układach
kropek kwantowych sprzężonych z nadprzewodnikiem”**

Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest analizie własności kropki lub kropek kwantowych sprzężonych z elektrodami, z których jedna jest normalna, a druga nadprzewodząca. Główne wyniki zaprezentowane są w trzech rozdziałach, prócz których na pracę składa się jeszcze krótki wstęp, podsumowanie, dwa dodatki oraz bibliografia licząca 129 pozycji. W sumie praca ma 146 stron.

Rozprawa rozpoczyna się bardzo krótkim, mającym niewiele ponad dwie strony, wprowadzeniem, w którym Pan mgr Barański przedstawia motywację wyboru tematyki badawczej. Nie ma natomiast typowego dla rozpraw doktorskich wstępu, wprowadzającego czytelnika w sposób ogólny w zagadnienia będące tematem rozprawy. Zmniejsza to nieco dydaktyczny aspekt pracy i czyni ją bardziej podobną do typowych publikacji naukowych. Nie jest to zarzut w stosunku do rozprawy, a raczej określenie drogi, którą doktorant wybrał przy jej konstruowaniu. Zresztą jego dorobek publikacyjny jest na tyle bogaty i jednorodny tematycznie, że z powodzeniem mógłby stanowić rozprawę.

Wyżej wspomniany brak typowego wstępu nie oznacza, że doktorant nie prezentuje aktualnego stanu wiedzy w obszarach, w których prowadził badania. Każdy rozdział rozpoczyna się od opisów - czasami krótszych, czasami dłuższych - zagadnień

wiążących się zarówno z fizycznym obrazem badanych zjawisk, jak i formalizmem używanym w prowadzonych obliczeniach. A obliczeń w pracy jest bardzo dużo i są to obliczenia wysoce nietrywialne. Skomplikowany charakter obliczeń wynika ze złożoności badanego układu. Na początku rozprawy, w najprostszej wersji mamy do czynienia z nadprzewodnictwem konkurującym lub współistniejącym z korelacjami kulombowskimi. Już w tej postaci pojawiają się zjawiska takie jak rozpraszanie Andreeva czy efekt Kondo. W dalszych częściach rozprawy dochodzi sprzężenie pomiędzy kropkami (skorelowanymi!), defazujące sprzężenie z rezerwuarem fermionowym czy sprzężenie z bozonami. W efekcie pojawiają się zjawiska interferencyjne, jak np. rezonans Fano, albo generowane są wielokrotne piki Andreeva. Modeli opisujących tak złożone układy nie można rozwiązać dokładnie i konieczne jest użycie przybliżonych metod analitycznych, przy czym końcowe wyniki i tak przeważnie trzeba uzyskać numerycznie. I właśnie swobodne operowanie przybliżeniami zasługuje na szczególne podkreślenie. Pan mgr Barański w wielu miejscach stopniuje podejście, startując z najprostszego przybliżenia, by w kolejnych krokach uwzględnić kolejne efekty. Daje to możliwość zobrazowania wpływu różnych czynników na badane zjawisko.

Zasadnicze wyniki pracy stanowią treść rozdziałów 2 do 4. Pierwszy z nich, zatytułowany *"Podprzerwowe stany Andreeva oraz wpływ korelacji elektronowych"*, rozpoczyna się od fizycznego opisu transportu przez granicę pomiędzy zwykłym metalem a nadprzewodnikiem, także w przypadku, gdy pomiędzy tymi materiałami znajduje się nanoukład, np. kropka kwantowa. Taki właśnie układ, tzn. kropka kwantowa sprzężona z jedną elektrodą normalną i jedną nadprzewodzącą, przewija się przez całą rozprawę, często w rozbudowanej postaci. Dalej w rozdziale drugim doktorant wprowadza formalizm funkcji Greena w notacji Nambu oraz metodę równań ruchu funkcji Greena. Hamiltonian użyty tu do opisu kropki sprzężonej do elektrod to hamiltonian Andersona. Pierwsze obliczenia prowadzone są dla kropki, w której pominięte jest oddziaływanie kulombowskie. W wyliczonej gęstości stanów widoczne są piki reprezentujące stany Andreeva, które pozwalają na transport przy energiach mieszczących się wewnątrz szczeliny nadprzewodzącej. Przypadek nieskorelowanej kropki analizowany jest dla różnych wartości sprzężeń do poszczególnych elektrod oraz

różne wartości szczeliny. Ciekawa jest tu część poświęcona wyliczeniu poszczególnych przyczynków do przewodnictwa różniczkowego. W kolejnej części rozdziału badana jest kropka, w której założone jest parowanie indukowane bliskością elektrody nadprzewodzącej. W tym wypadku brane jest już pod uwagę oddziaływanie kulombowskie, które przeciwdziała tworzeniu par Coopera. Przy podłączeniu takiej kropki do elektrod, pojawia się efekt Kondo, co jest tematem kolejnej części rozdziału drugiego. Obliczenia w tym przypadku prowadzone są w ramach przybliżeń sprowadzających się do odpowiednich rozszczepień funkcji Greena pojawiających się w równaniach ruchu. Występujące w równaniach energie własne obliczane są w sposób samozgodny. Wyliczana jest gęstość stanów oraz przewodnictwo różniczkowe.

Kolejny rozdział zatytułowany jest „*Kwantowe interferencje w układach nanoskopowych*” i poświęcony jest badaniom układu, w którym dołożona została druga kropka kwantowa. Obecność dwóch kropek pozwala na transport elektryczny różnymi kanałami, pomiędzy którymi może następować interferencja prowadząca do rezonansów Fano. Rozdział rozpoczyna się od zaprezentowania klasycznego układu sprzężonych oscylatorów w którym występują takie rezonanse. Dalej następują obliczenia dające odpowiedź na pytanie o związek pomiędzy efektami interferencyjnymi a indukowanym w kropce nadprzewodnictwem. Badany układ składa się z kropki sprzężonej z jedną elektrodą normalną, jedną nadprzewodzącą i dodatkowo z drugą kropką, która nie jest sprzężona z elektrodami. W obu kropkach występuje oddziaływanie kulombowskie i w obu kropkach indukowane jest parowanie. Co ciekawe, ponieważ kropka poboczna związana jest jedynie z kropką sprzężoną z elektrodami, parowanie w niej indukowane jest w sposób pośredni. Podobnie jak w poprzednim rozdziale główne wyniki to gęstość stanów i przewodnictwo różniczkowe. W szczególności zbadany został tu wpływ potencjałów oddziaływania kulombowskiego w poszczególnych kropkach. W kolejnej części rozdziału trzeciego kropka poboczna została sprzężona z rezerwuarem fermionowym. Sprzężenie to wykorzystywane jest do symulowania procesów dekoherencji. Okazuje się, że nawet słabe sprzężenie z elektrodą dekoherującą niszczy efekty rezonansowe, co widać poprzez zanikanie rezonansów Fano.

Rozdział czwarty, ostatni z rozdziałów prezentujących główne wyniki rozprawy, nosi tytuł „*Wpływ bozonowych stopni swobody na stany podprzerwowe*”. Zgodnie z tytułem w rozdziale tym układ złożony z kropki kwantowej i elektrod dodatkowo sprzęgany jest z bozonami. Podukład bozonowy modelowany jest jako mody wibracyjne molekuly, przy czym do rozseparowania fermionowych i bozonowych stopni swobody używana jest transformacja Langa-Firsova. Różnica w stosunku do klasycznego podejścia opartego o transformację Langa-Firsova polega tu na obecności elektrody nadprzewodzącej, a więc indukowanego parowania w kropce kwantowej. Podstawowym efektem dołożenia bozonów jest zwielokrotnienie stanów Andreeva widoczne w gęstości stanów i w przewodnictwie różniczkowym. Rozprawę kończy równie krótkie jak wstęp podsumowanie oraz dwa dodatki: dodatek A zawierający części „*Wyznaczenie wyrażenia na natężenie prądu*” oraz „*Energie i stany podstawowe sproksymizowanej kropki*” oraz dodatek B „*Wyznaczenie średniej po bozonowych stopniach swobody*”.

Większość wyników zaprezentowanych w rozprawie została opublikowana w recenzowanych czasopismach, w związku z czym nie należało spodziewać się w niej błędów merytorycznych. Tak więc nie mam żadnych poważniejszych zarzutów wobec materiału zaprezentowanego w rozprawie. Oczywiście w przypadku obliczeń, które nie mogą być wykonane dokładnie zawsze można dyskutować zasadność zastosowanych przybliżeń. W szczególności doktorant często posługuje się funkcją Greena, do odwrotności której energie własne będące wynikiem korelacji kulombowskich i hybrydyzacji wchodzi addytywnie [np. równanie (2.30) czy (3.22)]. Wydaje się, że przydałby się komentarz odnośnie zakresu stosowalności takiego przybliżenia. I ogólnie, w przypadku stosowania przybliżenia dobrze jest przynajmniej wspomnieć dlaczego takie przybliżenie może być zastosowane [np. nad wzorem (2.95) pojawia się informacja, że wyrazy zawierające propagatory cząstek o różnych spinach są pomijane, ale nie jest nic powiedziane, czy procesy w których obracany jest spin elektronu w badanym układzie nie występują]. Nie są to jednak poważne zarzuty, a brak niektórych dyskusji może wynikać z nie przykładania przez doktoranta zbyt dużej wagi do aspektu dydaktycznego rozprawy, o czym wspomniałem już na początku recenzji. Z tego też pewnie powodu w rozprawie nie ma prawie nic na temat metod

numerycznych używanych przy otrzymywaniu końcowych wyników.

Czytając rozprawę Pana mgr. Jana Barańskiego nie sposób nie dostrzec pozamerytorycznych problemów, z którymi musiał się zmagać w trakcie pisania. Chodzi o błąd jednoznacznych polskich odpowiedników niektórych fachowych terminów. Myślę jednak, że doktorant całkiem dobrze wybrnął z tych kłopotów, choć niektóre wprowadzone przez niego określenia - dla czytelnika znającego tematykę zupełnie zrozumiałe - mogą wydawać się dziwne. Na przykład często pojawia się w rozprawie termin „sproksymizowana kropka”, co oznacza kropkę kwantową, w której parowanie zostało zaindukowane przez efekt bliskości elektrody nadprzewodzącej. Tymczasem w języku polskim proksymizacja bywa używana do określenia pewnej techniki prowadzenia dyskursu politycznego. Nie do końca jestem przekonany, czy stany, które analizuje doktorant powinny być nazwane stanami „podprzerwowymi”, a nie „wewnątrzprzerwowymi” - przecież one leżą pomiędzy dolną a górną krawędzią przerwy. Innym przykładem niezbyt szczęśliwego tłumaczenia może być „operator liczenia cząstek”, który pojawia się pod wzorem (2.48), podczas gdy przyjęto się określenie „operator liczby cząstek”. W rozprawie można też znaleźć kilka błędów edytorskich, np. „delta diraca” pod wzorem (2.14), a w rozdziale 2.3.3 na przerwę nadprzewodzącą używane są trzy różne oznaczenia (Δ , Δ_S oraz Δ_{Sc}). Muszę jednak stwierdzić, że liczba tego rodzaju usterek lokuje się w „dolnej strefie stanów średnich”, co jest bardzo dobrym wynikiem, jeśli weźmie się pod uwagę ogromną liczbę miejsc w rozprawie, w których konieczne było stosowanie zawilej notacji matematycznej. Podkreślić należy także, że rysunki w rozprawie są czytelne i poprawnie opisane.

Przechodząc do ogólniejszej oceny recenzowanej rozprawy mogę z pełnym przekonaniem stwierdzić, że składa się na nią duża ilość ciekawych i oryginalnych wyników. O wartości przeprowadzonych przez doktoranta badań świadczy także fakt, że większość z otrzymanych wyników została opublikowana w bardzo dobrych czasopiśmie. Biorąc pod uwagę rozprawę, a także dorobek doktoranta, można stwierdzić, że wykazał się on dobrą znajomością w zakresie fizyki teoretycznej ciała stałego, w szczególności fizyki nanoukładów, oraz bardzo dobrze opanował aparat matematyczny niezbędny do prowadzenia badań w tym obszarze.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym*, jednocześnie wnosząc o dopuszczenie Pana mgr. Jana Barańskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Biorąc pod uwagę liczbę i znaczenie otrzymanych wyników, proponuję wyróżnienie rozprawy.



Maciej Maśka