



Mens agitat molem

Zakład Teorii Fazy Skondensowanej UMCS
Condensed Matter Theory Department

ul. Radziszewskiego 10
20 031 Lublin, POLAND

<http://kft.umcs.lublin.pl/ztf> fax: (+48 (0)81) 537 61 90

Prof. dr hab. Karol Izydor Wysokiński tel.(081)5376236 e.mail: karol@tytan.umcs.lublin.pl

Lublin 19 sierpnia 2013 r.

Opinia

o pracy doktorskiej pana **mgr inż. Grzegorza Ilnickiego** pt. „*Spinowo spolaryzowany i nadprzewodzący transport elektronowy w kropkach kwantowych*”

Opiniowana praca doktorska została wykonana w IFM PAN w Poznaniu pod kierunkiem dr hab. Jana Martinka, prof. IFM. Liczy ona 133 strony tekstu, składa się z Wprowadzenia, Podsumowania oraz 9 numerowanych rozdziałów. Spis literatury obejmuje 132 pozycje bibliograficzne, wśród których znajdujemy prace autora rozprawy. Pan Ilnicki jest współautorem 5 opublikowanych artykułów, z których 2 ukazały się w Phys. Rev. B, a 3 w Acta Physica Polonica A. Szósta praca została wysłana do publikacji.

Tematem rozprawy jest analiza transportowych właściwości hybrydowych struktur kwantowych zawierających kropki kwantowe w kontakcie tunelowym z elektrodami normalnymi, ferromagnetycznymi lub nadprzewodzącymi. Głównym celem rozprawy jest teoretyczna analiza i interpretacja czterech eksperymentów wykonanych przez japońskich i amerykańskich współpracowników Promotora. Dotyczą one kolejno: a) kropki kwantowej w postaci nanorurki węglowej w kontakcie z dwiema normalnymi elektrodami (eksperyment wykonany w Japonii), układu ferromagnetycznych kropek i 3 różnych zestawów elektrod, b) ferromagnetycznych, nadprzewodzących z Al i nadprzewodzących z NbN (eksperymenty amerykańskie). W zależności od wartości sprzężenia kropek do elektrod obliczenia wykonywano w ramach techniki równań Mistrza dla prawdopodobieństw w pierwszym lub wyższych rzędach rachunku zaburzeń albo metodą nierównowagowych funkcji Greena. W każdym z analizowanych przypadków przedstawiono dokładne dopasowanie teorii do wyników eksperymentu.

Pierwsze rozdziały (1-5) pracy doktorskiej poświęcono skrótowemu, ale precyzyjnemu omówieniu najważniejszych doświadczalnych wyników literaturowych związanych z prowa-

dzonymi badaniami oraz omówieniu stosowanych technik teoretycznych. Rozdziały (6-9) dotyczą tematyki prac. Zaprezentowano tam szczegóły związane z eksperymentami oraz ich oryginalną teoretyczną interpretację.

Całość pracy stanowi logiczny ciąg napisany w stylu monografii. Pewnie dlatego próba dokładnego prześledzenia przeprowadzonych obliczeń i ewentualnego ich powtórzenia napotyka na spore trudności, bo potrzebne wzory i przyjęte założenia znajdują się w kilku różnych rozdziałach pracy. Uwaga ta dotyczy także wstępnych informacji. I tak np. na str. 50 pracy w rozdz. 4.4 jest zdanie „*zależność energii całkowitych w stanach początkowych, końcowych i pośrednich od ω i ω' zapisano w rozdziale 6 w sekcji 6.6, a w rozdziale 9- w sekcji 9.3.2. „ P ” oznacza wartość główną całki*”. Autor za dużo wymaga od czytelnika.

Praca zasadniczo napisana jest poprawnym językiem i zawiera relatywnie mało literówek i innych błędów. Uważny czytelnik znajdzie jednak wiele zdań formalnie rzecz biorąc nielogicznych lub niegramatycznych. Na str. 31 np. znajdujemy fragment „*[...]niejednolicie uporządkowanie o wysokiej[...]*” a na str. 113 sekwencję wyrazów „*[...] jest więc w kluczowy sposób zależy[...]*”. Nie mam wątpliwości, że niegramatyczne zdania wynikają z mało starannego wprowadzania poprawek w kolejnych wersjach tekstu. Z innych uwag wspomnę, że na str. 35 pomyłone są relacje pomiędzy głębokością wnikania i długością koherencji dla nadprzewodników I i II rodzaju. Wzór (4.5) na stronie 46 jest błędny. Tunelowanie to proces jednocząstkowy, więc element macierzowy zawiera całkę z iloczynu dwu a nie czterech funkcji falowych.

Rozdział 6 pracy zatytułowany „*Efekty kotunelowania elektronów w kropkach kwantowych z nanorurek węglowych w obecności przejścia singlet – tryplet (S-T)*” omawia wyniki i interpretację jednego z eksperymentów, gdy jednościenna nanorurka węglowa została użyta jako kropka kwantowa. Zewnętrzne elektrody zostały wykonane z tytanu, a elektrodą bramki był silnie domieszkowy krzem. W układzie tym, który pozostawał w obszarze słabego sprzężenia obserwowano przejście singlet – tryplet. Obliczenia przeprowadzono techniką równań Mistrza uwzględniając procesy tunelowania sekwencyjnego oraz współtunelowanie z dokładnością do drugiego rzędu w hamiltonianie tunelowania.

Ponieważ doświadczalnie badano obszar gdy liczba elektrod na kropce zmieniała się od wartości N do wartości $N+4$, (gdzie N to nieznana liczba elektronów rezydująca na kropce) ograniczono się do rozważenia tylko dwu orbitali, z których każdy jest dwukrotnie zdegenerowany spinowo. Głównym elementem analizy było wyjaśnienie zależności prądu tunelowania od pola magnetycznego dla różnych liczb elektronów na kropce. Przy tym dwie spośród

czterech linii wykazywały zależność liniową od pola wynikającą z zeemanowskiego rozszczepienia stanów zdegenerowanych spinowo.

Dla wyjaśnienia niemonotonicznej zależności od pola magnetycznego linii (wysokiego przewodnictwa) na diagramie V_g (napięcie bramki) i B (pole magnetyczne) w obszarze gdy na kropce mogą się znajdować dwa elektrony zaproponowano, że zachowanie takie związane jest z przejściem od stanu singletowego dwu elektronów do stanu trypletowego i procesami nieelastycznymi. Taka możliwość pojawia się dzięki temu, że stan o spinie w górę jednego z orbitali (a) przesuwają się w górę na skali energii, a stan ze spinem w dół drugiego orbitala obniża swoją energię. Uwzględniono też możliwość procesów współtunelowania z udziałem dwu elektronów. Ilościowy opis uzyskano dodając relaksację stanu kropki w wyniki procesów odwrócenia spinu z udziałem, bądź bez, efektów orbitalnych. Uwzględnienie procesów relaksacyjnych dodatkowo poprawia już i tak dobrą zgodność zmierzonego i obliczonego kształtu linii prądu tunelowania w funkcji pola magnetycznego. Zmierzone słabe prądy w obszarze blokady kulombowskiej pomiędzy napięciem bramki odpowiadającym przejściom ze stanu $N+1$ do stanu $N+2$ oraz $N+2$ do $N+3$ zinterpretowano jako kotunelowanie dwuelektronowe przy anizotropii sprzężeń aktywnych orbitali do tej samej i do różnych elektrod.

Wyniki obliczeń przedstawione na rys.(6.8) pokazują wpływ parametrów asymetrii na kształt linii. Porównanie z liniami doświadczalnymi pozwoliło na wyznaczenie wartości asymetrii sprzężeń, które zmieniają się w zależności od napięcia transportowego i potencjału bramki. Asymetrie te mogą być rzędu 0,5 lub nawet więcej. Oszacowano też czas relaksacji singlet – tryplet na około $0,3 \mu s$. To są ważne i trudno mierzone parametry charakteryzujące badany układ i jego dynamikę.

Wspomniane wcześniej eksperymenty amerykańskiej grupy dotyczyły badań układów złączy tunelowych z warstwą kropek kwantowych. Przygotowanie złączy i ich charakterystyki opisane są w rozdziale 7 rozprawy. Dowiadujemy się tam, że kropki z CoFe (ewentualnie domieszkowane borem) zanurzone są w warstwie krystalicznego izolatora MgO. Zewnętrzne elektrody do jednego z eksperymentów są ferromagnetyczne i wykonane też z CoFe. W kolejnym eksperymencie, takie same kropki kwantowe były w kontakcie tunelowym z elektrodami z glinu, który staje się nadprzewodnikiem poniżej temperatury 2K lub azotku niobu (NbN) nadprzewodzącego aż do temperatury 12K.

Teoretyczna analiza doświadczeń transportowych dla tych trzech rodzajów próbek została opisana w rozdziałach 8 i 9 pracy. We wstępie do rozdziału 8 autor stwierdza „*Grupa prof. S. S. P. Parkina dokonała pomiarów, my natomiast pokazujemy z punktu widzenia teorii,*

że istotnie mamy tu do czynienia z efektem Kondo a nie – sygnałami innego rodzaju”. Takiego zdania wyjaśniającego zabrakło mi w rozdziale 6 rozprawy, gdzie autor analizował eksperyment grupy japońskiej. Tam w podsumowaniu Rozdziału autor stwierdza: „Podsumowując – przeprowadzono pomiary [...]”. Czy to oznacza współudział w wykonaniu doświadczenia?

Wyniki doświadczalne i ich teoretyczna analiza opisana w rozdziale 8 rozprawy dotyczą złączy typu ferromagnetyk – kropka kwantowa – ferromagnetyk. Uzyskane zależności przewodnictwa różniczkowego od napięcia transportowego dla różnych temperatur, pól magnetycznych i grubości próbki zinterpretowano jako przejaw zjawiska Kondo, ewentualnie współwystępującego z kotunelowaniem. Badane złącza wykazały podwójne lub pojedyncze maksimum typu Kondo. Zinterpretowano je jako przejaw zjawiska Kondo w układzie z równoległym lub antyrównoległym ustawieniem magnetyzacji elektrod ferromagnetycznych. Kluczowym argumentem za tym, że obserwowane przebiegi można przypisać zjawisku Kondo było dopasowanie temperaturowej zależności przewodnictwa dla zerowego napięcia do empirycznego wzoru zaproponowanego przed laty z okazji pierwszych obserwacji zjawiska w kropce kwantowej. Wynik dopasowania jest przedstawiony na rysunku 8.8b.

Dopasowanie jest bardzo dobre, ale zastanawiająca jest olbrzymia wartość temperatury Kondo T_K uzyskana z tego dopasowania, równa 70,8 K, podczas gdy wynik doświadczalny wskazuje na wartość około 15K, a więc blisko 5 razy mniejszą. Olbrzymia jest też wartość innego parametru dopasowania $s=4,39$ podczas gdy w oryginalnej pracy wyniósł on około 0,22. Pewnie można podać wiele argumentów dlaczego te wartości tak istotnie się różnią, ale chętnie usłyszę argumenty kandydata na doktora na ten temat podczas publicznej obrony.

Ostatni rozdział pracy opisuje obserwacje grupy prof. Parkina oraz własną analizę teoretyczną autora rozprawy właściwości transportowych przez układ magnetycznych kropek kwantowych w kontakcie tunelowym z dwiema elektrodami nadprzewodzącymi. Płaskie złącza tunelowe zawierały wiele kropek kwantowych CoFe. Ponieważ materiał kropek i wykonanie tych złączy są podobne do złączy ferromagnetycznych można było przyjąć, że temperatura Kondo T_K jest taka sama jak uprzednio i wynosi około 10K – 20K. Oznacza to, że dla złączy z elektrodami glinowymi realizuje się sytuacja $k_B T_K > \Delta$, natomiast dla złączy z elektrodami NbN szczelina nadprzewodząca Δ jest szersza od $k_B T_K$.

Omawiając założenia proponowanego modelu i wyniki uzyskanych obliczeń autor sugeruje pewien scenariusz, który wymaga dokładniejszej odpowiedzi na następujące pytania. Jaki jest dowód na to, że kropki mają aktywny tylko jeden stan kwantowy? Jakie argumenty przemawiają za tym, żeby słabiutką anomalię dla $T=14K$ i $16K$ dla złączy z NbN (rys. 9.56)

traktować jako przejaw zjawiska Kondo? Anomalia jest słaba i ze wzrostem temperatury wydaje się być silniejsza, podczas gdy interpretacja w ramach zjawiska Kondo wymaga raczej osłabienia efektu. Czy pętla histerezy musi oznaczać istnienie oddziaływań pomiędzy kropkami? Czy oddziaływanie wewnątrz kropek nie mogą dać takiego sygnału? Są to pytania, które rodzą się po przeczytaniu opisu doświadczeń i wstępnych sugestii ich interpretacji. Niezależnie od dość przekonującej i logicznej argumentacji w pracy doktorskiej na rzecz proponowanego scenariusza chciałbym usłyszeć pogłębioną dyskusję tych problemów w trakcie publicznej obrony.

Ostatecznie obliczenia teoretyczne, uzupełnione heurystycznymi argumentami, prowadzą do zadziwiająco dobrego dopasowania wyników obliczeń do danych eksperymentalnych. Fragmenty pracy dotyczące ilościowych dopasowań są jednak mało precyzyjne. Dla czytelnika (a dotyczy to przynajmniej recenzenta) nie jest jasne co oznacza dodanie liniowego tła do obliczonej przewodności (§8.3.3), albo co oznacza w praktyce wzmianka w opisie rysunku 9.10 „*Oprócz tego do wykresów dodano także tło zaokrąglone w okolicach $V=0$ i w przybliżeniu liniowe dla większych napięć zgodnie z pracą [108]*”. Pomijam już to, że zwrot ‘tło zaokrąglone’ to niezrozumiały żargon. W pracy [108] autorzy argumentują, że to procesy wielokrotnych rozproszeń są odpowiedzialne za tło. A w recenzowanym doktoracie najważniejsze z tych procesów są – moim zdaniem – już uwzględnione więc wydawało by się, że wynik teoretyczny powinien być (pół-)ilościowo zgodny z doświadczeniem. Ciekaw jestem jak wielkie jest to dodane tło w porównaniu z obliczonym efektem i z czego ono wynika w tym przypadku? Nie jest też dla mnie do końca jasne, dlaczego parametr α rozprężania par w polu magnetycznym przyjmuje wartość niezerową także dla pola zerowego?

Po tych pytaniach o dodatkowe szczegóły chciałbym stwierdzić, że przedstawione w rozprawie doktorskiej argumenty za objaśnieniami doświadczeń z elektrodami z NbN w ramach tunelowania przez stany singletowe i trypletowe układu dwu kropek kwantowych są przekonujące i logiczne. Objaśnienie braku rozszczepienia w polu magnetycznym szczegółowo przedstawione na rys. 9.9 jest bardzo eleganckie. Wysoko i pozytywnie oceniam wysiłki autora w dogłębne przedstawienie argumentów fizycznych za takim a nie innym scenariuszem, przybliżeniem, czy modelem użytym do interpretacji.

Przeprowadzone w rozprawie obliczenia pokazują, że autor znakomicie rozumie problemy fizyczne badanych zjawisk, potrafi precyzyjnie analizować zachowania układu dostrzegając istotne zależności i parametry. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem, posiada logiczny układ treści i zawiera dobry opis ogólny zjawisk zachodzących w badanych

strukturach. Zawiera precyzyjną i dogłębną analizę wspomnianych wcześniej doświadczeń i z pewnością należy do grupy prac wyróżniających się.

W kontekście otrzymanego regulaminu wyróżniania prac i wymogu istnienia takiego wniosku w recenzji, chciałbym zaznaczyć, że zwykle nie wnioskuję o wyróżnienia doktoratów przed zakończeniem procedury, czyli przed publiczną obroną. Dlatego oficjalnie zastrzegam sobie prawo ewentualnego dopisania takiego wniosku po publicznej obronie. I aby nie było żadnych wątpliwości pracę tę oceniam jako bardzo dobrą. Autor w ścisłej współpracy z grupami doświadczalnymi podał interpretację fizyczną czterech zupełnie nowych eksperymentów. A należy pamiętać, że współpraca z doświadczalnikami to nie jest zawsze łatwe zadanie. Należy nie tylko mieć dobre rozeznanie fizyki badanych zjawisk, ale należy rozumieć szczegóły eksperymentów i teorii. I z tym wszystkim Pan Ilnicki sobie bardzo dobrze poradził, choć zapewne równie wielkie zasługi ma na tym polu Promotor rozprawy.

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

