



Mens agitat molem

Zakład Teorii Fazy Skondensowanej UMCS
Condensed Matter Theory Department

ul. Radziszewskiego 10
20 031 Lublin, POLAND

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

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

Lublin dn. 21 kwietnia 2010 r.

Opinia na temat pracy doktorskiej
pana **mgr Damiana Krychowskiego** pt. „*Analiza wpływu silnych korelacji i
interferencji na transport elektronowy w nanostrukturach*”

Opiniowana rozprawa doktorska ma 97 stron druku i zawiera odnośniki do 129 pozycji literatury. Składa się ona ze wstępu, podsumowania oraz 5 obszernych rozdziałów. Oparta jest w części o wyniki, które już zostały opublikowane w 7 publikacjach, z których trzy ukazały się w Acta Physica Polonica, dwie w J. Alloys and Compounds, jedna w J. Magn. Magn. Materials oraz kolejnej, która w pracy doktorskiej została uwzględniona jako będąca w przygotowaniu, ale już ukazała się drukiem w Phys. Rev. B z 2010r. Wszystkie publikacje zostały wykonane we współpracy z doc. Stanisławem Lipińskim promotorem pracy doktorskiej.

Pierwsze dwa rozdziały rozprawy doktorskiej to wprowadzenie w jej tematykę od strony doświadczalnej (rozdział 1) i opisu teoretycznego (rozdział 2). Omawia w nich autor obszerny materiał doświadczalny, a także 3 różne techniki fizyki teoretycznej. Z konieczności omówienie tych zagadnień jest pobieżne i często mało precyzyjne. Rozdziały te mają za cel wprowadzenie czytelnika w zagadnienia rozważane w rozprawie, nakreślenie zakresu badań i przedstawienie stosowanych metod teoretycznych, dlatego nie zatrzymuję się nad nimi dłużej. Mam tylko drobną uwagę merytoryczną do sformułowania na str. 12, gdzie autor pisze: „*Utworzenie rezonansu Kondo umożliwia mieszanie stanów z dwóch przeciwległych elektrod, co zwiększa przewodnictwo*”. Jest tu pewna subtelność. Powyższe sformułowanie może sugerować, że stan Kondo pojawia się na kropce niezależnie od jej sprzężenia z elektrodami. W rzeczywistości stan Kondo jest stanem wielociałowym kropki i każdej z elektrod, co w warunkach równowagowych prowadzi do zmieszania stanów obu elektrod. W warunkach nierównowagowych tworzą się dwa odrębne rezonanse Kondo.

Liczący 23 strony tekstu rozdział 3 pracy doktorskiej zatytułowany „*Spinowo-orbitalny efekt Kondo*” jest pierwszym, w którym omawiane są wyniki własnych badań autora. Po omówieniu zjawiska Kondo o ogólnej symetrii $SU(N)$, w znacznej mierze opartym o znane wyniki literaturowe, skoncentrowano się na zjawisku o symetrii $SU(4)$ występującym w kropkach kwantowych w postaci krótkich nanorurek węglowych. W układach takich realizowana jest symetria $SU(4)$ z dwoma spinowymi i dwoma orbitalnymi stopniami swobody. Autor omawia taką kropkę umieszczoną pomiędzy dwiema elektrodami uporządkowanymi ferromagnetycznie. Stosując metodę równań ruchu dla funkcji Greena i przybliżenie znane w literaturze jako „przybliżenie Lacroix” wraz z pewnymi jego uogólnieniami, oblicza szereg interesujących wielkości. W szczególności jest to przewodnictwo elektryczne układu w warunkach zjawiska Kondo w zależności od napięcia bramki oraz dla różnych temperatur. Uzyskane przez pana Krychowskiego wyniki dobrze zgadzają się ze zmierzonymi przez Jarillo-Herero i współpracowników. Obliczone przewodnictwo elektryczne ma nieco za małą wartość w porównaniu z eksperymentem. Zaniżona wartość przewodnictwa może być związana, moim zdaniem, z użytą techniką obliczeniową (jak to wynika z porównania zamieszczonego w pracy [29] wyników dla przewodnictwa obliczonego za pomocą różnych technik rachunkowych). Autor wiąże ten fakt z uproszczeniem modelu lub z obecnością w doświadczeniu dodatkowego kanału rozpraszania. Chętnie podyskutuję o tym ważnym problemie podczas publicznej obrony.

W rozdziale tym doktorant bada także wpływ pola magnetycznego (równoległego i prostopadłego do osi nanorurki węglowej) na przewodnictwo, zagadnienie filtru spinowego, magneto-opór tunelowy nanorurki podłączonej do ferromagnetycznych elektrod z równoległą i antyrównoległą orientacją magnetyzacji oraz prądy spinowe. Duże i pozytywne wrażenie robi elegancka analiza prądów spinowych. W modelowym Hamiltonianie uwzględniono procesy odwrócenia spinu na kropce. Procesy te istotnie modyfikują zależność tunelowego magneto-oporu oraz prądów spinowych od napięcia transportowego.

Czwarty rozdział pracy zatytułowany został „*Efekt Fano-Kondo*”. Rozważana jest tam interferencja stanów rozciągłych i stanów zlokalizowanych (zjawisko Fano) w obecności zjawiska Kondo o symetrii $SU(4)$ lub $SU(2)$. Autor rozważa dwie geometrie układu, które nazywa rezonatorem w kształcie litery T (jest to kropka kwantowa sprzężona tunelowo z nieoddziałującą kropką pomiędzy elektrodami czyli *de facto* z drutem kwantowym) oraz układem mostkowym (w którym pomiędzy elektrodami znajduje się kropka sprzężona tunelowo, przy czym elektrody sprzężone są ze sobą dodatkowym kanałem). Ten drugi układ stwarza, wykorzystaną przez pana Krychowskiego, okazję do zbadania wpływu zewnętrznego

pola magnetycznego. Silne korelacje na kropce uwzględniono w ramach przybliżenia bozonów pomocniczych w reprezentacji Kotliara-Ruckensteina słusznej dla dowolnych wartości oddziaływania U . Bardzo interesującym wynikiem jest znakomita zgodność obliczeń z pomiarami, uzyskana jednak dopiero przy uwzględnieniu drugiego poziomu na kropce bez oddziaływania. Ciekaw jestem, na ile ten wynik jest czuły na wybór parametrów Fano q i q_1 . Z tekstu też nie wynika, czy parametry te, lub przynajmniej jeden z nich, mogą być wydedukowane z doświadczenia. Czy zastosowanie metody NCA i uwzględnienie tylko jednego z poziomów kropki nieoddziałującej dałoby wyniki równie dobre jak uzyskane dla dwu poziomów? Czy te same wartości parametrów q i q_1 równie dobrze opisują wynik doświadczalny dla temperatury $T = 50\text{mK}$?

W dalszej części tego rozdziału dyskutowany jest wkład dwu sprzężonych pojemnościowo układów typu T i mostkowych. W tym drugim przypadku uwzględniono dodatkową możliwość sterowania układem za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego, co uzyskano przez uwzględnienie całki przeskoku z dodatkowymi fazami. Analiza w części 4.3 jest jednak skrótowa i trudna do prześledzenia. W szczególności zupełnie nieczytelny jest opis zależności dudnień od temperatury. Legenda i podpis do rys. 4.10c sugerują występowanie dudnień zarówno dla $T = 0\text{K}$ jak i $T_K/10^6$, natomiast opis w tekście wprowadza zależną od fazy temperaturę Kondo wcześniej niż definiowaną i za jej pomocą formułuje odpowiedni warunek. Podobnie skrótowo, ale bardziej zrozumiale opisane są wyniki obliczeń przewodnictwa w układzie dwu kropek, z których każda połączona jest z elektrodami, natomiast kropki sprzężone są pojemnościowo parametrem U' . Przewidziano, że dla ujemnych wartości tego sprzężenia możliwe jest występowanie rezonansu i zjawiska Kondo na obu lub na jednej kropce, w zależności od tego czy ich poziomy energetyczne są różne czy jednakowe.

Ostatni rozdział opisujący oryginalne wyniki pracy doktorskiej jest zatytułowany „Analiza szumu śrutowego w reżimie Kondo”. Po krótkim zdefiniowaniu szumu w zjawiskach transportu i omówieniu przybliżeń stosowanych w celu obliczenia wielocząstkowych funkcji Greena metodą równań ruchu, autor przedstawił wyniki własne dla kilku interesujących go sytuacji. Najpierw rozważył szum śrutowy dla układu o pełnej symetrii $SU(4)$ i przedyskutował jego zależność od napięcia oraz temperatury. Sporo uwagi poświęcił zmianom współczynnika Fano pod wpływem napięcia bramki i napięcia transportowego oraz jego zależności od oddziaływania U , asymetrii złącza i pola magnetycznego. Pole magnetyczne łamie symetrię $SU(4)$ układu i szczególnie silnie modyfikuje współczynnik charakteryzujący szum śrutowy. W przypadku elektrod

ferromagnetycznych autor definiuje zależne od spinu współczynniki Fano i analizuje ich zmienność w funkcji napięcia dla dwu konfiguracji namagnesowania. W rozdziale tym uzyskano niektóre wyniki w ramach różnych przybliżeń dla funkcji Greena, w tym metody bozonów pomocniczych, równań ruchu oraz przybliżenia NCA.

Praca doktorska napisana jest w sposób zwięzły i logiczny. Układ treści jest poprawny, a cytowania literatury są zasadniczo bez zastrzeżeń. Nie oznacza to, że wszystko jest bez zarzutu. Uważny czytelnik znajdzie trochę literówek, kilka nielogicznych lub niegramatycznych zdań. Czytelnika wrażliwego na czystość j. polskiego może denerwować częste zastępowanie pięknych słów języka polskiego pokracznymi spolszczeniami tych słów. Z obowiązku Recenzenta, przedstawiam poniżej najbardziej rażące błędy językowe i redakcyjne.

W pracy pojawiają się żargonowe określenia, np. „w limicie [silnego i słabego sprzężenia]”. Pewnie lepiej byłoby użyć polskiego odpowiednika „w granicy”. Podobnie zamiast w „reżimie Kondo” lepiej brzmi w j. polskim w „warunkach zjawiska Kondo”. Osobiście nie lubię stwierdzenia „korelacje kondowskie”. Znacznie lepiej brzmi „korelacje Kondo”. Lepiej jest też mówić o „zjawisku” niż o „efekcie”, „właściwościach” niż „własnościach”. Słowo energia jest rodzaju żeńskiego i dlatego niepoprawne jest stwierdzenie „ma tą samą energię”. Poprawnie jest „ma tę samą energię” (str. 11). Ten błąd powtarza się wielokrotnie. Szczególnie rażące jest nagminne używanie zwrotów „w limicie”, „w reżimie”, „na insecie”.

Co oznacza fizycznie zwrot „siła pola”? W paru miejscach cytowania prac są błędne lub brakuje odnośnika. Tak jest na str. 15, gdzie zamiast pracy [34] dwukrotnie cytowana jest praca [4]. Zupełnie niezrozumiałe jest wprowadzenie pokracznych spolszczeń w miejsce poprawnych i eleganckich polskich nazw. Na str. 32 czytamy „w pracy posługujemy się opóźnioną (retardowaną) G^R i przedwczesną (adwansowaną) G^A funkcją Greena”. Dalej z upodobaniem używa autor błędnych w j. polskim określeń „retardowana” i „adwansowana”. Te oraz inne „makaronizmy”, jak np. str. 55 „[...] odwrócenie spinu na kropce (efekt „spin-flipu”) na TMR [...]” to zwykły brak szacunku dla języka polskiego.

Większą staranność wykazał autor formułując wzory. Jedyna zauważona literówka to błędnie zdefiniowany prąd spinowy na stronie 55 jako suma prądów dla dwu wartości spinu, podczas gdy powinna być różnica. W kilku miejscach znalazłem niezręczne, lub pewnie niedobrze poprawione zdania, jak np. na str. 62: „Formuła prądową dla modelu b-QD można wyrazić następująco:” lub str. 74 – podpis do rys. 4.12 – „Wpływ słabego oddziaływaniem międzywęzłowym [...]”. Czytanie pracy jest nieco utrudnione przez brak jednostek wielkości

przedstawianych na niektórych rysunkach oraz niepełne podpisy pod nimi. Często tylko część parametrów jest wyszczególniona w legendzie lub podpisie, pozostałe należy wyszukiwać w tekście. Dość przypadkowo i nie zawsze we właściwych miejscach rozmieszczone są nowe akapity.

Cechą charakterystyczną pracy doktorskiej pana Damiana Krychowskiego jest dążność do analizy układów i wielkości, dla których wykonano już odpowiednie pomiary i ich teoretyczny opis. Gdzie tylko było to możliwe, porównał uzyskane wyniki teoretyczne z doświadczeniem. Praca stanowi konsekwentną analizę zjawiska Kondo i zjawisk interferencyjnych, głównie w układach o symetrii $SU(4)$. Najczęściej wspomnianym przykładem układu o takiej symetrii jest nanorurka węglowa z jej symetrią orbitalną $SU(2)$ i symetrią spinową, ale rozważane są także układy kropek kwantowych w odpowiednich konfiguracjach. Część rozważanych struktur posiada symetrię $SU(2)$. Wyniki uzyskane dla tej symetrii też są bardzo cenne, gdyż dotyczą interesujących i słabo przebadanych układów i służą porównaniu obu symetrii. Autor stosuje proste, ale właściwe dla konkretnego układu modele teoretyczne. Skupia się na uzyskaniu informacji o mierzalnych wielkościach. Dąży do dokładnego zrozumienia badanych wielkości i czyni to bardzo dobrze. Swobodnie korzysta z różnych zaawansowanych metod fizyki teoretycznej. Do obliczenia nierównowagowego transportu stosuje metodę funkcji Greena w sformułowaniu Keldysza. Obliczenie funkcji Greena układów oddziałujących wymaga dalszych przybliżeń. Pan Krychowski opanował i z powodzeniem stosuje metodę równań ruchu i technikę bozonów pomocniczych. Tę ostatnią stosuje w dwu wersjach – z jednym i dwoma bozonami pomocniczymi oraz w przybliżeniu średniego pola (statycznym).

Oprócz prądu ładunkowego i spinowego analizuje także jego fluktuacje, które są teoretycznie scharakteryzowane wielkością szumu śrutowego i uogólnionego współczynnika Fano. Wielkości te obliczane są w pracy dla kropki lub układu kropek kwantowych połączonych tunelowo z zewnętrznymi elektrodami normalnymi lub uporządkowanymi ferromagnetycznie.

Jak już wspomniałem na początku opinii, rezultatem badań mgr Krychowskiego jest 11 już opublikowanych prac i jedna dalsza w druku. Nie wszystkie te publikacje „zmieściły” się w pracy doktorskiej i zgodnie ze stwierdzeniem doktoranta 7 z nich wchodzi w zakres pracy doktorskiej. Jest to nieczęsta, ale godna pochwały sytuacja, gdy doktorant oprócz rozprawy doktorskiej może pochwalić się opublikowanym dorobkiem naukowym nie wchodzącym do rozprawy. Wyniki swoich badań prezentował podczas 9 konferencji

krajowych i międzynarodowych. Osiem razy w trakcie sesji posterowych, a jeden raz ustnie na spotkaniu realizatorów grantu europejskiego CARDEQ.

Biorąc pod rozwagę uzyskane wyniki naukowe, liczbę poruszanych trudnych zagadnień oraz zastosowany do badania zaawansowany formalizm fizyki teoretycznej nie mam wątpliwości, że recenzowana rozprawa z naddatkiem spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora. Dlatego z pełnym przekonaniem stawiam wniosek o dopuszczenie pana mgr inż. Damiana Krychowskiego do publicznej obrony.

Chciałbym też zastrzec sobie prawo do ewentualnego wniosku o wyróżnienie tej pracy i jej autora nagrodą. Z takim wnioskiem mam zwyczaj występować po publicznej obronie, gdyż dopiero sposób prezentacji wyników i styl odpowiedzi na pytania daje pełen obraz przewodu doktorskiego.

