



# UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI

## Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego

Zakład Teorii Materii Skondensowanej  
Kierownik Zakładu: Prof. dr hab. Józef Spałek

ul. Reymonta 4  
30-059 Kraków

Tel.: (48 12) 663 56 85  
Fax: (48 12) 633 40 79  
E-mail: ufspalek@if.uj.edu.pl

*plus ratio quam vis*

Kraków, 14 czerwca 2006

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej Doktora Jana Martinka zatytułowanej  
"Transport zależny od spinu w układach z silnym oddziaływaniem kulombowskim"  
przedstawiona Radzie Naukowej Instytutu Fizyki Molekularnej PAN**

W skład rozprawy habilitacyjnej wchodzi 11 prac współautorskich, wszystkie z nich opublikowane w renomowanych czasopismach międzynarodowych i poza jedną, wszystkie opublikowane w zespole międzynarodowym. W 5 pracach dr Martinek jest pierwszym autorem, z czego dwie są publikacjami w Phys. Rev. Lett. i jedna opublikowana w Phys. Rev. B. Z polskiej strony jako współpracowników należy wymienić Profesorów Bogdana Bułkę i Józefa Barnasia, którzy należą do pionierów tej tematyki w Polsce, i których oświadczenia pozwalają stwierdzić, iż duża część prac współautorskich polegała na przeważającym wkładzie Dr Martinka. Oświadczenia zagranicznych współautorów świadczą o zasadniczym wkładzie habilitanta w części prac. Piszę o tych szczegółach formalnych, gdyż dorobek publikacyjny jest znakomity, chodzi mi tylko o oryginalny wkład habilitanta. Jest tak dlatego, że Dr Martinek nie opublikował ani jednej pracy monoautorskiej w swojej karierze i muszę przyznać, że byłoby to świetne uzupełnienie jego samodzielności. Oczywiście, zdolność do współpracy z innymi ośrodkami to świetna perspektywa dla budowy swojego zespołu naukowego; jako recenzent muszę jednak zwrócić uwagę na samodzielność twórczą habilitanta w momencie jej uzyskiwania. Znakomity dorobek pod względem jakościowym i ilościowym przeważa zdecydowanie na korzyść habilitanta. Przechodzę teraz do oceny jego prac wchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej, a następnie do krótkiego omówienia całłościowego dorobku naukowego.

Badania transportu jedno- czy kilku-elektronowego (w tym efektów spinowych) to osiągnięcie granic dla elektroniki. Z tego też względu opis kwantowy jest tutaj jedynym możliwym i metody pomiarowe wyjątkowo wysublimowane mimo klasycznego charakteru

elektrod. Habilitant włączył się do głównego nurtu tych badań wprowadzając przede wszystkim elektrody ferromagnetyczne, co prowadzi do szeregu nowych możliwości związanych z możliwościami różnej orientacji spinowej elektrod, efektów zależnych spinowo w zależności od rodzaju badanego (nano)układu, modyfikacji efektu Kondo w różnego rodzaju układach, itd. Czy takiego typu bardzo ciekawe badania podstawowe doprowadzą do zastosowań spintronicznych, nie jest jeszcze jasne.

W pracy nr 1 (J. Martinek et al., JMMM **207**, L1 (1999)) rozważono efekty spinowe w prądzie tunelowym pojedynczych elektronów pomiędzy dwoma elektrodami ferromagnetycznymi poprzez tzw. wyspę metaliczną. Już w tej pracy pojawiają się zasadnicze elementy serii przyszłych prac, aczkolwiek autorzy używają jeszcze pojęcia pojemności układu, co nie nadaje się do opisu kilkuelektronowej kropki kwantowej. Otrzymano charakter oscylacyjny (w funkcji przyłożonej do elektrod różnicy potencjałów) dla szeregu własności takich jak moment magnetyczny (zwany tutaj akumulacją spinową) układu, magnetoopór poprzeczny. Ten charakter oscylacyjny wydaje się wynikać z dyskretnej natury poziomów energetycznych układu i z tego, że na każdym poziomie może być nieparzysta lub parzysta liczba elektronów. Czy mam rację? Czy reguła Hunda byłaby tu istotna jeśli kropka jest układem skorelowanym? Brakuje mi tu szczegółowej analizy fizycznej wyników.

W pracy nr 2 (B. R. Bułka et al., Phys. Rev. B **60**, 12246 (1999)) autorzy rozważają szum śrutowy w jednoelektronowych urządzeniach tunelowych. Podobnie, jak w poprzedniej pracy rozważają reżym tzw. tunelowania sekwencyjnego. Autorzy pokazują, że składowa tego szumu kwantowego pochodząca od fluktuacji spinu jest dużo ważniejsza, niż fluktuacje ładunku. Jest to zrozumiałe, gdyż odpychające oddziaływanie kulombowskie (korelacje!) są dużo silniejsze i w związku z tym fluktuacje ładunku są silnie wygaszane. Takie samo zjawisko ma miejsce w układach skorelowanych makroskopowych. Efekty kulombowskie prowadzą raczej do blokady i właśnie tunelowania sekwencyjnego.

W pracy nr 3 (J. Barnaś et al., Phys. Rev. B **62**, 12363 (2000)) autorzy wracają do oryginalnego problemu z pracy nr 1 (do pewnego stopnia praca nr 1 jest powtórzeniem pracy nr 3; ta ostatnia jest bowiem szersza, gdyż wprowadza detale rachunkowe). Schodki na krzywej akumulacji ładunku są oczywiste, gdyż poszczególne kanały (stany wzbudzone jednoelektronowe) włączają się do transportu tunelowego ze wzrostem napięcia. Nietrywialną rzeczą jest policzenie fluktuacji akumulacji ładunku i spinu. Muszę powiedzieć, że brakuje mi

w tej pracy Hamiltonianu układu i wynikającej z niego struktury poziomów energetycznych układu wypisanej *explicite*. W szczególności brakuje mi odpowiedzi na pytanie, czy blokada kulombowska wyrażająca korelacje pomiędzy elektronami w układzie w sposób pełny jest opisana przez ten opis fenomenologiczny w kategoriach oporu, pojemności, itd. Do tej pory wydawało mi się, że taki opis zawodzi dla kropek kwantowych. Czy się mylę? Będę bardzo wdzięczny habilitantowi za wyjaśnienie tego aspektu podejścia w czasie kolokwium.

W pracy nr 4 (J. Martinek et al., Phys. Rev. B **66**, 014402 (2002)) autorzy rozważają w dalszym ciągu akumulację ładunku i spinu na wysepce metalicznej umieszczonej pomiędzy dwoma elektrodami ferromagnetycznymi i dyskutują tunelowanie pojedynczych elektronów przez taką wyspę nazywając to tranzystorem jednoelektronowym ze względu na to, że do wysepki można podłączyć potencjał sterujący. Piszę o tym szczególnie dopiero teraz, gdyż dopiero w tej pracy autorzy podali Hamiltonian układu mieszając obraz kwantowy tunelujących pojedynczych elektronów i obraz klasyczny pojemnościowo-oporowy wyspy. W tej krótkiej, ale ważnej pracy autorzy używają techniki diagramowej do otrzymania procesów kotunelowania w wyższym rzędzie. Pokazano wpływ tych procesów na akumulację spinową oraz przewodnictwo różniczkowe w zależności od wyboru rodzaju ferromagnetyka (Fe czy Ni) jako materiału na elektrodę.

Po tych pierwszych 4 pracach rodzi się pytanie czy nie będą występowały oscylacje typu Friedela na granicach wyspa-elektroda? Także, spinowa akumulacja spowodowana jest przepływem ładunku z elektrod na wyspę i vice versa. Jak tego typu zjawisko zależy od parametrów układu i elektrod? Ile tych parametrów jest? Te pytania są bardzo istotne ze względu na to, że są to prace czysto teoretyczne i trudno mi rozsądzić, które czynniki są najistotniejsze. Jestem pewien, że habilitant zna odpowiedź na te pytania; poruszam je ponieważ nie są one dyskutowane w pracach.

W pracy nr 5 (J. König & J. Martinek, Phys. Rev. Lett. **90**, 166602 (2003)) autorzy rozważają precesję spinową w tzw. zaworach spinowych w kropkach kwantowych. Praca ta oznacza ten zwrot w zainteresowaniach autora, gdyż traktuje problem w ramach modelu mikroskopowego z uwzględnieniem oddziaływania Hubbarda dla elektronów w warstwie izolatora przedzielającej dwie elektrody ferromagnetyczne. Policzono przede wszystkim zależność liniowej przewodności w funkcji kąta między magnetyzacjami w elektrodach i wykazano, że w temperaturze  $T=0$  takie przewodnictwo znika dla antyrównoległej orientacji

momentów elektrod. Taki rezultat jest łatwy do przewidzenia, gdyż przypomina mechanizm podwójnej wymiany w ferromagnetykach. Oznacza on, że przeskok elektronu ze spinem określonym przez pierwszą elektrodę jest niemożliwy, gdy druga elektroda ma polaryzację spinową przeciwną, gdyż wymaga to zmiany jego energii większej, aniżeli jego energia kinetyczna. Oczywiście, efekty przypowierzchniowe mogą obrócić spin elektronu, jeśli czas relaksacji jest szybki w porównaniu z energią (całą) przeskoku elektronu i to jest właśnie ten efekt precesji opisany w bardziej wyrafinowany sposób w pracy. Należy nadmienić, iż jeśliby występował efekt Kondo na kropce, efekt przewidywany przez autorów powinien zniknąć !

W pracy nr 6 (J. Martinek et al., J. Supercond. **16**, 343 (2003)) autorzy rozważają nierównowagowe fluktuacje spinowe w tranzystorach jednoelektronowych i kropkach kwantowych. Jest to powrót do formalizmu i opisu z pierwszych 4 prac, więc nie będę jej szczegółowo omawiał, gdyż jest ona krótka. Nie podoba mi się w niej jednak to, że autorzy dyskutują tunelowanie poprzez stany wysokospinowe kropki, a zaniedbują regułę Hunda. Rozumiem, że jest to praca uzupełniająca do poprzednich.

W pracy nr 7 (J. Martinek et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 127203 (2003)) autorzy rozważają efekt Kondo w kropkach kwantowych sprzężonych do elektrod ferromagnetycznych i analizują go w funkcji ich polaryzacji spinowej. Jest to nietrywialny problem, gdyż mogłoby się wydawać, że elektrony z elektrod są w stanie całkowicie wykompensować spin na domieszce włączając go do stanu kolektywnego. Oczywiście tak nie jest i całe zjawisko zależy nie tylko od wzajemnej polaryzacji elektrod, ale też od przyłożonego pola magnetycznego. Czy przewidywany efekt (rozszerzenie rezonansu Kondo) i zaproponowany przez autorów eksperyment w nanorurkach został przeprowadzony ? Należy zaznaczyć, że wyniki zostały otrzymane metodą skalowania dla grupy renormalizacji zaproponowaną w grupie niemieckiej.

Podobny charakter ma praca nr 8 (J. Martinek et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 247202 (2003)); nie będę jej zatem omawiał w szczegółach. Dopełniający obszar (słabego sprzężenia) został rozpatrzony w pracy nr 10 (M. Brau et al., Phys. Rev. B **70**, 195345 (2004)).

W pracy nr 9 (Y. Utsumi et al., Phys. Rev. B **69**, 155320 (2004)) rozpatrzono oddziaływanie wymienne między dwoma kropkami kwantowymi z użyciem pierścieni typu

Aharonova-Bohma. Jest to oddziaływanie typu RKKY, ale ze stałą wymiany zależną od strumienia magnetycznego objętego przez pierścień.

W końcu, w pracy nr 11 (A. N. Pasupathy et al., Science 306, 86 (2004)) autorzy próbują przetestować doświadczalnie ideę spinowo-rozszczepionego rezonansu Kondo przewidzianego wcześniej przez J. Martinka ze współpracownikami używając do tego celu fullerenu  $C_{60}$ . Rozszczepienie spinowe jest za duże, żeby je wyjaśnić w przybliżeniu lokalnego pola efektywnego. Jednakże, jego zależności od napięcia, temperatury i zewnętrznego pola magnetycznego zgadzają się z przewidywaniami teoretycznymi. Jest to piękne potwierdzenie koncepcji teoretycznych przy rozsądnych wartościach parametrów dopasowania.

Podsumowując, niniejsza rozprawa składa się z dwóch dość niezależnych części. W pierwszej habilitant przedstawia ogólny formalizm transportu tunelowego pojedynczych ładunków i spinów poprzez wyspę pomiędzy dwoma elektrodami ferromagnetycznymi. W drugiej części Dr Martinek opisuje wpływ tych elektrod na efekt Kondo w kropce kwantowej. Otrzymane wyniki są oryginalne i nawet fakt, że są to prace wieloautorskie, nie stanowi żadnej przeszkody, iż mogą zostać użyte w rozprawie. Na szczególne podkreślenie zasługuje potwierdzenie doświadczalne rozszczepionego spinowo rezonansu Kondo, aczkolwiek ilościowa teoria wymagać będzie najprawdopodobniej uwzględnienia reguły Hunda, a zatem wzięcia pod uwagę orbitalnej degeneracji stanów elektronowych w kropce kwantowej. Przeczytanie tych prac zajęło mi trochę czasu, ale dużo się z nich nauczyłem.

Biorąc pod uwagę całość dorobku składającego się z około 40 publikacji po doktoracie w recenzowanych czasopismach międzynarodowych, nie mam wątpliwości, iż stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych należy się Doktorowi Janowi Martinkowi. Co więcej, uważam, iż ta habilitacja mogła być przeprowadzona nieco wcześniej. Dodatkowo, wnioskuję o jej wyróżnienie. Proszę zatem o dopuszczenie Doktora Jana Martinka do kolokwium habilitacyjnego.

  
Józef Spalek

profesor zwyczajny nauk fizycznych