

Prof. Lucjan Jacak  
Instytut Fizyki  
Politechniki Wrocławskiej  
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

W-w, 15 marca 2006

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej  
dra Piotra Stefańskiego**

**pt.**

***Silne korelacje elektronowe i kwantowa interferencja w  
transporcie przez kropki kwantowe i nanostruktury***

Przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna dra Piotra Stefańskiego z Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu dotyczy aktualnych zagadnień transportu kwantowego przez nanostruktury metaliczne/półprzewodnikowe nazywane kropkami kwantowymi. Jest to silnie rozwijany obecnie obszar badań związany z perspektywnymi zastosowaniami nanotechnologicznymi i spintronicznymi, nieodzwrotnie spodziewanymi w rozwoju kolejnych etapów miniaturyzacji elektronicznych, opto-elektronicznych, magneto-elektronicznych i informatycznych urządzeń, także powszechnego użytku. Stąd wielkie zainteresowanie i silny rozwój badań podstawowych oraz technologii otrzymywania i sterowania strukturami o odpowiedniej skali miniaturyzacji – skali *nano*, w wielostronnym aspekcie rozmaitych, często całkowicie nowych efektów fizycznych, charakterystycznych wyłącznie dla takich układów. W tym zakresie własności transportowe przez kropki i ich układy stanowią jeden z bardzo ważnych kierunków o potencjalnie ogromnym znaczeniu dla konstrukcji nowych transportowych urządzeń elektronicznych w tej skali, takich jak kwantowe tranzystory, diody, magnetyczne tranzystory, często nazywane w tym kontekście urządzeniami jedno-elektronowymi, gdyż zjawiska transportowe (i ich sterowanie) w skali *nano* odnoszą się do kwantowych cech pojedynczych nośników (elektronów) i kwantowych zjawisk interferencyjnych, w stopniu niespotykanym w przypadku makroskopowych urządzeń elektronicznych. Te uwarunkowania dodają dodatkowe ważne argumenty w ocenie przedstawionej pracy, gdyż wskazują na właściwie wybrany kierunek, ściśle powiązany z podkreślaną coraz mocniej w odniesieniu do fizyki aplikacyjnością/innowacyjnością.

Przedstawiona rozprawa habilitacyjna składa się z cyklu publikacji samodzielnych i częściowo współautorskich w czasopismach międzynarodowych:

Phys. Rev. Lett. (2 współautorskie, B. Bułka(2), A. Tagliacozzo(1))

Solid State Comm. (1 samodzielna, 1 współautorska., B. Bułka, A. Tagliacozzo)

Acta Phys. Polonica B (1 samodzielna)

Phys. Sta. Sol. B (1 współautorska, B. Bułka)

Mol. Phys. Rep (1 współautorska, B. Bułka)

Publikacje, zwłaszcza w Phys. Rev. Lett wskazują na dużą wartość naukową rezultatów. Świadczy o tym także niemała liczba cytowań (łącznie 118, w odniesieniu także do pozostałych publikacji w dorobku dra P. Stefańskiego, w liczbie 39 – wg. załączonego zestawienia).

Do rozprawy dołączone są też: omówienie cyklu wybranych publikacji, autoreferat, kopie prac i inne dokumenty określone przepisami, w tym oświadczenia współautorów wskazujące na istotny udział dra P. Stefańskiego w publikacjach współautorskich.

Badania będące przedmiotem rozprawy mają charakter teoretyczny. Jest to kwantowy opis nano-kontaktów przy użyciu technik funkcji Greena. Dużo uwagi poświęcono rezonansowym/wielociałowym efektom kontaktowym – efektowi Kondo i Fano, których znaczenie rośnie w kontekście kontaktów kropek kwantowych. Zastosowano nierównowagowe funkcje Grena-Keldysa, przy pomocy których wyrażono prąd przez kontakt nanostruktury, co pozwala na modelowe badanie rozmaitych zjawisk transportowych poprzez dobór stosownych członów efektywnego hamiltonianu. Tu zasadniczym z kolei czynnikiem ułatwiającym/umożliwiającym stosunkowo prostą analizę jest posłużenie się typowym modelowym hamiltonianem Hubbarda, w którym transport koresponduje z założonymi parametrami przeskoku, a oddziaływanie z parametrem typu *on-site*. Należy tu podkreślić pewną swobodę i doświadczenie w aspekcie użycia modelu Hubbarda, co z pewnością wiąże się z dużym dorobkiem w tym względzie całego poznańskiego ośrodka. Model kropki kwantowej jest bardzo uproszczony – sprowadza się w zasadzie do założenie dyskretnego zestawu jej poziomów kwantowych. Sama kropka rozumiana jest tu wąsko i modelowo – odnosi się do wybranej heterostruktury Ga(Al)As/GaAs z dodatkowymi elektrodami metalowymi (dyfuzyjnymi). Choć pojęcie kropek kwantowych i ich praktycznych realizacji jest daleko szersze (także w kontekście efektów transportowych), to zawężenie eksperymentalnego odniesienia nie jest specjalnym mankamentem, gdyż należy oczekiwać raczej dużego podobieństwa efektów, których dotyczy praca (rezonansowych i interferencyjnych), gdyż istotną rolę odgrywają tu same dyskretnie poziomy nano-ograniczonego układu, co jest wspólną cechą wszystkich kropek. Autor zresztą wskazuje na podobne zachowania w rozmaitych nano-strukturach, nawet np. w zgiętych nanorurkach węglowych. Oczywiście szczegóły potencjału wiążącego rozmaitych kropek, a co za tym idzie, wzajemne związki z nośnikami na zewnątrz w kontaktach-elektrodach (np. ich hybrydyzacja ze zlokalizowanymi stanami), będą wpływać na charakterystyki opisywane w pracy w uproszczonym modelu kropki i można się spodziewać dalszych komplikacji i uszczegółowienia opisu (być może nawet istotnych efektów, choćby związanych z różną geometrią i kształtem układu kropka/kontakt, polami zewnętrznymi modyfikującymi potencjał wiążący, ‘jonizacją’ kropek, etc.).

Opis uzyskanych rezultatów świadczy o dużej swobodzie i rozeznaniu autora w zakresie dyskutowanych efektów. Cały komentarz utrzymany jest na jakościowym poziomie, odwołując się do zrozumiałych, klarownie przedstawianych modelowych opisów złożonych sytuacji rachunkowych, tych jednak pozostawianych korzystnie w tle dyskusji. Pośród zasadniczych tez pracy autor wymienia:

- opis rezonansu Fano w układzie dwóch kropek połączonych równolegle do jednokanałowego drutu (małe kropki),
- zbadanie roli oddziaływań poprzez elektrody między poziomami w dużej kropce kwantowej,
- opis współzawodnictwa interferencji i rezonansu Kondo w dużych kropkach,
- próba wyjaśnienia tzw. ‘anomalii 0.7’ w przewodnictwie nanokontaktu,
- wyjaśnienie efektu tzw. *pojemnościowej czułości ładunkowej*.

Odnosne rezultaty znajdują się w dobrej korespondencji z obserwacjami eksperymentalnymi. Są częściowo motywowane poprzednimi badaniami eksperymentalnymi (jak np. ‘anomalie 0.7’), a także stanowią istotną wskazówkę dla dalszych poszukiwań doświadczalnych – to bez wątpienia ważny argument za bardzo dobrą oceną całej rozprawy.

Opisane efekty rezonansowe – interferencyjne typu Fano i wielociałowe (w sensie perturbacyjnym) typu efektu Kondo, ich wzajemne związki i konkurencja, a także modyfikacje przy zmianach reżimów i wielkości kropek, to bez wątpienia bardzo ważne i interesujące efekty w nanostrukturach, wyraźnie wychodzące ponad dominujący poprzednio schemat prostej blokady kulombowskiej. Właściwie opisane efekty znajdują potwierdzenia eksperymentalne, co ma kluczowe znaczenie dla projektowania użytecznych struktur typu jedno-elektronowy tranzystor (tranzystor spinowy) w technologii kropek kwantowych. W tym aspekcie, najbardziej istotnym dla oceny rozprawy, należy docenić zatem wysoki standard badań teoretycznych/modelowych na styku z prowadzonym obecnie eksperymentem i dostrzec wiele istotnych rezultatów uzasadniających bezspornie bardzo wysoką ocenę merytoryczną przedstawionej rozprawy. Bardzo ciekawa w szczególności jest przedstawiona w rozprawie próba wyjaśnienia tzw. 'anomalii 0.7' w przewodnictwie nanokontaktu i choć uzyskany postęp poprzez uwzględnienie efektów korelacyjnych wydaje się podążać w oczekiwanym kierunku, warto by rozwinąć ten temat np. o badania i zachowania w polu magnetycznym (być może są inne dodatkowe uwarunkowania tej kwantowej osobliwej charakterystyki).

W aspekcie formalnej strony przedstawionej rozprawy odnieść się można tylko do załączonego opisu prac w języku polskim (same prace zamieszczone w renomowanych czasopismach – a zwłaszcza dwie w Phys. Rev. Lett spełniają oczywiście wszelkie wymogi formalne, określone niezależnie warunkami edytorskimi czasopism). Opis napisany jest natomiast stosunkowo swobodnie, być może nawet momentami zbyt swobodnie, czy niestarannie (np. swobodnie brzmiące frazy: 'ciekawość badacza' – str. 31, 'piękny eksperyment' – str. 16, 'mniej ujemne' – str. 28) – wynika to być może z entuzjazmu naukowego autora i w gruncie rzeczy nie jest istotne, choć zauważalne. W wielu miejscach (zaznaczone na dostarczonym egzemplarzu) dopatrzyć się można także niezręczności stylistycznych – na przykład posługiwanie się angielskimi terminami/zapożyczeniami (typu *limit*, *kotunelling*, *kondunktancja*, *kontrolować*, *etc*). Nie mają one oczywiście żadnego wpływu (podobnie jak liczne uchybienia w interpunkcji) na ocenę rozprawy.

Niewielkim uchybieniem jest też pewnie nazwanie w tekście opisu (nie szukałem w publikacjach) odniesienia się do zasady nieoznaczoności energii i czasu, jako do zasady Heisenberga – str 17, co wydaje mi się nieprawdziwe wobec faktu, że pozycja tej zasady jest zupełnie inna w mechanice kwantowej, wobec braku obserwabli czasu w jej standardowym sformułowaniu (jest to zatem inna zasada nieoznaczoności niż zasada typu Heisenberga dla pary nie komutujących obserwabli).

W odniesieniu do całego dorobku dra P. Stefańskiego, to obejmuje on ponad 40 publikacji (przed doktoratem 17) i blisko 30 doniesień konferencyjnych, łącznie ponad 100 cytowań, udział w realizacji kilku grantów KBN, kilka zaproszonych wykładów, także doświadczenia zdobyte w zagranicznych ośrodkach. Dorobek ten, w dużej części odnoszący się do wcześniej prowadzonych przez dra P. Stefańskiego badań z zakresu magnetycznych własności fazy skondensowanej, z pewnością można uznać za wystarczająco znaczący i spełniający wymagania formalne w odniesieniu do postępowania habilitacyjnego.

Reasumując uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom habilitacyjnym – w sposób jasny i wystarczający formułuje nowy i szeroki fragment wiedzy odnośnie transportu w nanostrukturach, co jest najważniejszym i decydującym argumentem. Wysoki standard publikacji (coraz liczniej cytowanych) jest tu także przekonującym dowodem wysokiej jakości i oryginalności rezultatów. Wnoszę zatem o dopuszczenie dra Piotra Stefańskiego do dalszych etapów postępowanie habilitacyjnego. W uznaniu wysokiej jakości przedstawionej rozprawy wnoszę też o stosowne wyróżnienie jej przez Radę Naukową, w przypadku pozytywnego przebiegu i oceny kolokwium habilitacyjnego.



Lucjan Jacak