

Prof. dr hab. Stanisław Robaszkiewicz
2006r.
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. A. Mickiewicza
w Poznaniu

Poznań dnia 8 kwietnia 2006

RECENZJA

rozprawy habilitacyjnej doktora Piotra Stefańskiego pt. „Silne korelacje elektronowe i kwantowa interferencja w transporcie przez kropki kwantowe i nanokontakty” oraz ocena jego dorobku naukowego.

Dr Piotr Stefański ukończył studia w roku 1985 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu ze specjalnością fizyka teoretyczna. Pracę magisterską pt. „Wzbudzenia kolektywne w TmCd w fazie kwadrupolowej” wykonał pod kierunkiem prof. Leona Kowalewskiego. Stopień doktora nauk fizycznych uzyskał w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN w roku 1991, na podstawie pracy „Własności magnetyczne związków międzymetalicznych $RFe_{10}T_2$, $T = Si, V, Cr$ ”, której promotorem był prof. Alojzy Wrzeczono. Od roku 1985 jest pracownikiem naukowym IFM PAN w Poznaniu.

Specjalnością naukową dra P. Stefańskiego jest fizyka fazy skondensowanej.

Dorobek naukowy dra Stefańskiego obejmuje 46 artykułów naukowych (w tym 4 jednoautorskie) oraz 32 komunikaty konferencyjne. Z tego na okres po doktoracie przypada 29 artykułów i 26 komunikatów.

Zdecydowana większość prac została opublikowana w czasopismach z listy filadelfijskiej (z wyjątkiem [10], [37], [42]), m.in. Physical Review Letters (2), J. of Magnetism and Magnetic Materials (13), Phys. Stat. Sol. (a, b) (8), Solid State Commun., (5) oraz w trzech monografiach.

Prace dra Stefańskiego były cytowane przez innych autorów ponad 124 razy (wg ISI Web of Science, wrzesień 2005).

Rozprawę habilitacyjną zatytułowaną „Silne korelacje elektronowe i kwantowa interferencja w transporcie przez kropki kwantowe i nanokontakty” stanowi cykl siedmiu oryginalnych publikacji poprzedzonych obszernym trzydziestoczczerostronicowym podsumowującym komentarzem w języku polskim.

Prace te opublikowano w renomowanych czasopismach: dwa artykuły w *Physical Review Letters*, dwa w *Solid State Commun.*, w *Phys. Stat. Sol.(b)* (jeden), w *Acta Phys. Polon. B* (jeden), i w *Mol. Phys. Reports* (jeden). Ich tematyka jest spójna i podporządkowana tematowi rozprawy. Dwie z tych prac są indywidualne, trzy dwuautorskie (z prof. B. Bułką) i dwie trójautorskie (z prof. B. Bułką i prof. Tagliacozzo). W czterech z nich (prace IV-VII), dr Stefański jest pierwszym autorem, z oczywistym złamaniem kolejności alfabetycznej, a współautorzy jednoznacznie stwierdzają, że ich wkład był wyłącznie doradczy. Nadesłane oświadczenia współautorów prac zespołowych nie pozostawiają wątpliwości co do oryginalnego i dominującego lub bardzo znaczącego wkładu dra Stefańskiego w wykonane badania, zarówno w sformułowanie problemu jak i jego rozwiązanie.

Rozprawa habilitacyjna dra P. Stefańskiego dotyczy bardzo interesujących zagadnień związanych ze zjawiskami kwantowego transportu przez kropki kwantowe i nanokontakty. Głównym celem prac składających się na rozprawę było zbadanie roli silnych korelacji elektronowych i kwantowej interferencji w przewodności tych układów. Jest to tematyka bardzo aktualna i ambitna. Teoria efektów korelacji elektronowych stanowi niewątpliwie jeden z podstawowych problemów fizyki nanostruktur. Na tym tle rezultaty uzyskane przez Autora zasługują na wysoką ocenę.

W recenzowanych pracach kropka kwantowa i jej sprzężenie z elektrodami opisywana jest jednodomieszkowym modelem Andersona oraz jego

różnymi modyfikacjami, odpowiednimi dla konkretnych sytuacji eksperymentalnych. Odpowiednikiem zlokalizowanej domieszki w metalu jest tutaj dyskretny poziom energetyczny zlokalizowany w kropce kwantowej. Elektrody grają rolę makroskopowych rezerwuarów elektronów przewodnictwa. Oddziaływania kulombowskie elektronów są proporcjonalne do energii ładowania kropki. W rozważanych układach wielkość hybrydyzacji zlokalizowanego poziomu z elektrodami oraz położenie tego poziomu względem wypadkowego poziomu Fermiego w elektrodach mogą być kontrolowane poprzez napięcie bramek. W opisie efektów nierównowagowych używano podejścia dla funkcji Greena rozwiniętego przez Keldysza i in. Natomiast korelacje elektronowe uwzględniane były w ramach różnych komplementarnych schematów przybliżeniowych, w zależności od badanego problemu i siły oddziaływań. W szczególności stosowane było interpolowane podejście perturbacyjne (Interpolative Perturbative Scheme - IPS), bazujące na rozwinięciu perturbacyjnym ze względu na oddziaływanie kulombowskie U w układzie [prace II-VI], a także, w przypadku silnych oddziaływań, metoda równań ruchu dla funkcji Greena, z różnego typu rozszczepieniami funkcji wyższego rzędu, domykającymi układ równań, m.in. podejście rozwinięte przez C. Lacroix w *J. Phys. F.: Metal Phys.* **11**, 2389 (1981) [praca I], a także przybliżenie typu „Hubbard I”, (Hewson 1966, Hubbard 1963, 1964), dla opisu dynamicznego oddziaływania ładunkowego [praca VII].

Do bardzo wartościowych i oryginalnych rezultatów badań Autora przedstawionych w rozprawie należy zaliczyć:

- 1) Zaproponowanie i szczegółowa analiza modelu kropki kwantowej silnie sprzężonej z elektrodami, w którym transport odbywa się przez poziom zlokalizowany na kropce oraz kanałem bezpośrednio łączącym elektrody (bridge channel) [praca I; artykuł ten ma w chwili obecnej już ponad 40 cytowań].

W analizowanym modelu kropkę opisuje zmodyfikowany model Andersona

z dodatkowym członem odpowiadającym kanałowi bezpośredniemu. Pokazano, że model ten tłumaczy eksperymentalnie obserwowane pojawienie się rezonansów Fano w przewodności przez małą kropkę kwantową (w obecności silnych korelacji elektronowych). Potwierdzona doświadczalnie jest również przewidziana przez teorię modulacja transmisji przez zewnętrzne pole magnetyczne (efekt Aharonowa – Bohma) [np. I. Nygard et al. Nature 408, 342 (2000), K. Kobayashi et al. Phys. Rev. Lett. 88, 256806 (2002)].

2) Zbadanie efektów korelacji elektronowych w układzie dwóch oddziaływujących kropek kwantowych połączonych równoległe do jednokanałowego kwantowego drutu [prace II, III].

W takiej geometrii kropki kwantowe zachowują się jak centra rozpraszające działające destruktywnie na transmisję przez drut (analogicznie jak ma to miejsce dla magnetycznych domieszek w metalach). W ramach rozważanego modelu opisano przejście od klasycznego rezonansu Fano , w którym poziom rezonansowy jest jednocząstkowy, do „wielociałowego” rezonansu Fano (specyficznego dla nanoukładów), w przypadku którego poziomem rezonansowym jest wielociałowy pik Kondo.

3) Nowe wyniki odnośnie teorii transportu elektronowego przez duże kropki kwantowe, a więc układy w których odległości $\Delta\epsilon$ między ich dyskretnymi poziomami są małe i porównywalne z ich poszerzeniem temperaturowym, względnie szerokością spowodowaną sprzężeniem z elektrodami [prace IV, V, VII] .

W szczególności:

(i) Zanalizowano model dużej kropki kwantowej w reżimie Kondo z dwoma aktywnymi poziomami energetycznymi, silnie sprzężonej z elektrodami [IV]. W ramach tego modelu zbadano rolę pośrednich oddziaływań (poprzez elektrody) między poziomami w dużej kropce. Otrzymane rezultaty pozwoliły na wyjaśnienie powstawania minimum w przewodności różniczkowej dla zerowego napięcia pomiędzy elektrodami oraz przesu-

nięcia piku przewodności związanego z silnymi korelacjami, obserwowanych eksperymentalnie [J. Schmidt et al., *Physica B* 256, 182 (1998)].

- (ii) Przedstawiono model uwzględniający zróżnicowaną strukturę energetyczną dużej kropki kwantowej dla tzw. granicy półotwartej (semioopen regime) [praca V]. Uwzględnia on dwa typy stanów: stan kropki ε_0 mocno zhybrydyzowany z elektrodami oraz zbiór zlokalizowanych poziomów γ nie sprzężonych bezpośrednio z elektrodami. Oddziaływania elektronowe na poziomie ε_0 rozważone zostały w przybliżeniu interpolowanego podejścia perturbacyjnego (IPS) (by uwzględnić ich dynamikę prowadzącą do efektu Kondo), a na poziomach γ – w przybliżeniu HFA. W ramach takiego podejścia uzyskano interesujący opis współzawodnictwa rezonansu Kondo i interferencji kwantowej w dużej kropce, a otrzymane rezultaty pozwoliły na rozsądną interpretację zachowania przewodności dla dużych, półotwartych kropek kwantowych, obserwowanego eksperymentalnie [C. Fühner et al., *Phys. Rev. B* 66, 161305 (2002)].
- (iii) W pracy [VII] zbadano wpływ akumulacji ładunku na transport elektronowy przez dużą półotwartą kropkę kwantową. Proponowany model do opisu tego zjawiska podobny jest do modelu z pracy V. W jego analizie zaniedbano dynamiczne oddziaływania elektronowe na poziomie ε_0 (zwanym tutaj stanem brzegowym – edge state), uwzględnione zostały natomiast oddziaływania elektronowe U na poziomach γ (core state) – w ramach przybliżenia Hubbard I oraz oddziaływania kulombowskie U między elektronami na poziomach γ i poziomie ε_0 – w przybliżeniu HFA. Rozwinięte podejście pozwala na opis zjawiska pojemnościowej czułości ładunkowej (charge sensing) i ewolucji kształtu rezonansów Fano pod wpływem uwięzionego ładunku. Otrzymane teoretycznie krzywe przewodności pozostają w dobrej zgodności z pomiarami

eksperymentalnymi przewodnictwem przez kwantowe kontakty sprzężone pojemnościowo z kropkami kwantowymi [A. C. Johnson et al. Phys. Rev. Lett. 93, 106803 (2004)].

Załączony do cyklu publikacji habilitacyjnych obszerny komentarz rozsądnie podsumowuje główne rezultaty rozprawy. Jego pewnym mankamentem jest brak szerszej, krytycznej dyskusji przybliżeń stosowanych w analizie rozważanych modeli (w szczególności odnośnie sposobów uwzględniania efektów korelacji elektronowych) oraz porównań z rezultatami prac innych autorów badających podobne modele.

Takie krytyczne omówienie różnych konkurencyjnych podejść teoretycznych, używanych do opisu korelacji elektronowych w kropkach kwantowych, [m.in. przybliżenie niekrzyżujących się diagramów (NCA), numeryczna grupa renormalizacji (NRG) i różnego typu podejścia bozonów niewolniczych (SBMFA, etc)] oraz zakresu ich stosowalności przedstawił niedawno dr P. Stefański na zaproszonym przeze mnie seminarium w Instytucie Fizyki naszego Uniwersytetu.

Podsumowując mogę stwierdzić, że recenzowana rozprawa zawiera szereg nowych, bardzo interesujących rezultatów i stanowi oryginalny, poważnie znaczący wkład Autora do teorii kwantowego transportu w nanostrukturach. Artykuły oryginalne składające się na rozprawę są napisane precyzyjnie i przejrzysto. Wykonane przez Autora prace świadczą o dobrym opanowaniu zaawansowanych metod teorii wielu ciał i rozległej wiedzy w zakresie fizyki nanoukładów.

Dorobek naukowy dra P. Stefańskiego nie włączony przez niego w zakres habilitacji jest również znaczący. Obejmuje on 39 prac naukowych, w tym 22 po doktoracie.

W dorobku tym do wyróżniających się należy zaliczyć:

(1) Obszerłą grupę prac, będących kontynuacją tematyki rozprawy doktorskiej, dotyczących badań własności magnetycznych związków międzymetalicznych ziem rzadkich z żelazem typu: ziemia rzadka (R) - metal przejściowy- bor, oraz $RFe_{10}T_2$, gdzie $T=Si, V, Cr$ [18, 24, 25, 27-29, 32]. W szczególności zanalizowane zostały źródła anizotropii magnetokrystalicznej w tych układach, określono parametry pola krystalicznego i ich wpływ na anizotropię.

(2) Prace [26, 33] dotyczące badań związków międzymetalicznych ziem rzadkich z cynkiem RZn_{12} ($R=Tb, Tm$). Określono w nich, przy zastosowaniu prostego modelu pola krystalicznego, różne wkłady do całkowitej anizotropii magnetycznej podsieci ziem rzadkich i metalu przejściowego. Otrzymane rezultaty pozwalają ocenić pod względem aplikacyjnym przydatność związków o strukturze tetragonalnej o różnych składach, w zależności od pierwiastka ziemi rzadkiej.

(3) Pracę [44], w której zbadano własności transportowe dwóch kropek kwantowych połączonych szeregowo, w warunkach transportu silnie nieliniowego. Zanalizowano (przybl. pola średniego) transport w warunkach spinowo zależnej gęstości stanów w elektrodach i opisano efekt histerezy prądowo-napięciowej w złączach molekularnych.

(4) Obszerne prace [38,43], dyskutujące rolę korelacji elektronowych w spinowo-zależnym transporcie w nanourządzeniach, a nie włączone do habilitacji.

Dr Piotr Stefański uczestniczył w realizacji trzech dużych grantów KBN, (w tym dwukrotnie jako główny wykonawca), oraz w realizacji grantu zamawianego „Nowe efekty fizyczne i materiały do zastosowań w elektronice spinowej” (kier. prof. J. Barnaś). Obecnie jest głównym wykonawcą kolejnego grantu KBN „Korelacje elektronowe w transporcie przez nanostruktury” (kier. prof. B. Bułka).

W roku 1996 dr P. Stefański odbył roczny staż w Institut für Festkörper und Werkstofforschung w Dreźnie (stypendium fundacji Humboldta). Od kilku lat owocnie współpracuje z prof. A. Tagliacozzo z Uniwersytetu „Federico II” w Neapolu .

Dr Stefański aktywnie uczestniczył w licznych międzynarodowych i ogólnopolskich konferencjach i warsztatach badawczych, na których przedstawił kilkadziesiąt komunikatów i wygłosił 4 referaty plenarne. Czterokrotnie wygłaszał także wykłady i seminaria na zaproszenie w ośrodkach krajowych i zagranicznych (Drezno 1996, Uniwersytet Warszawski 2004, Uniwersytet w Neapolu 2004, Uniwersytet w Hanowerze 2005).

Dr P. Stefański otrzymał dwie nagrody za osiągnięcia naukowe: w 1990 roku - Nagroda Grupowa PAN dla zespołu za „Badania magnetyczne związków lantanowców - metal przejściowy - bor”, oraz w roku 1991 – Nagroda Dyrektora IFM PAN za pracę doktorską.

Podsumowując całokształt działalności naukowej dra P. Stefańskiego można jednoznacznie stwierdzić, że jest on dojrzałym i samodzielnym badaczem. W swoich pracach podejmuje istotne i aktualne problemy. Jego rozprawa habilitacyjna oraz pozostały dorobek naukowy wnoszą wartościowy wkład do fizyki teoretycznej fazy skondensowanej, a w szczególności do fizyki nanoukładów.

Biorąc pod uwagę całokształt dorobku naukowego, a w szczególności rozprawę habilitacyjną uważam, że spełniają one wymagania dla nadania dr Piotrowi Stefańskiemu stopnia doktora habilitowanego w zakresie nauk fizycznych. Wnoszę więc o przyjęcie recenzowanej rozprawy jako habilitacyjnej i dopuszczenie doktora Piotra Stefańskiego do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

S. Robaszkiewicz
Stanisław Robaszkiewicz