

Prof. dr hab. Karol Izydor Wysokiński
Instytut Fizyki UMCS
ul. Radziszewskiego 10, 20-031 Lublin

Lublin 30 stycznia 2006 r.

Opinia na temat
pracy habilitacyjnej pt. „*Silne korelacje elektronowe i kwantowa interferencja w transporcie przez kropki kwantowe i nanokontakty*” i dorobku naukowego
doktora Piotra Stefańskiego

Dr Piotr Stefański urodził się 18 kwietnia 1961 r w Poznaniu. Ukończył studia fizyczne na Uniwersytecie Adama Mickiewicza na specjalności fizyka teoretyczna. Pracę magisterską „*Wzbudzenia kolektywne w TmCd w fazie kwadрупolowej*” wykonał pod kierunkiem prof. Leona Kowalewskiego i obronił w 1985 roku. Po studiach rozpoczął pracę w Instytucie Fizyki Molekularnej, gdzie pod kierunkiem prof. Alojzego Wrzeciono wykonał doświadczalną pracę doktorską „*Własności magnetyczne związków międzymetalicznych $RFe_{10}T_2$, Fe =lantanowiec, $T=Si, V, Cr$* ”, którą obronił 10 grudnia 1991 roku. Recenzentami w przewodzie, przeprowadzonym przez Radę Naukową IFM PAN w Poznaniu byli prof. Andrzej Szytuła i prof. Henryk Szymczak.

Opiniowana rozprawa habilitacyjna „*Silne korelacje elektronowe i kwantowa interferencja w transporcie przez kropki kwantowe i nanokontakty*” to zbiór siedmiu oryginalnych prac naukowych poprzedzonych 34-stronicowym wprowadzeniem. Wśród prac wchodzących w zakres habilitacji są 2 opublikowane w Phys. Rev. Lett., 2 w Solid State Commun., oraz po jednej w Acta Physica Polonica, physica status solidi oraz Molecular Physics Reports. Dwie prace są autorstwa dra Stefańskiego, w trzech współautorem jest prof. Bogdan Bułka, a w dwu dodatkowo Arturo Tagliacozzo. W czterech wieloautorskich pracach dr Stefański jest pierwszym autorem, jawnie łamiąc porządek alfabetyczny. Prace te powstały w latach 2001-2005 i stanowią zwarty tematycznie cykl poświęcony badaniom współlistnienia i wzajemnego wpływu zjawiska Kondo i zjawiska Fano w nanostrukturach zawierających kropkę kwantową lub punktowy kontakt kwantowy. Zjawisko Fano związane jest z występowaniem kwantowej interferencji w transporcie, zaś zjawisko Kondo polega na rezonansowym rozpraszaniu i pojawieniu się wielociałowego stanu zlokalizowanego wokół spinu kropki kwantowej. Oryginalną propozycję objaśnienia wyników doświadczalnych transportu elektronowego przez tranzystor jednoelektrodowy za pomocą modelu Andersona opisującego kropkę kwantową sprzężoną z dwiema elektrodami zawarto w pracy Phys. Rev. Lett. **81** (2001) 5128. Praca ta odbiła się szerokim echem w literaturze przedmiotu i już była cytowana grubo ponad 40 razy.

Ponieważ prace wchodzące w skład habilitacji są wieloautorskie zadaniem recenzenta jest ustalić, w jakiej części zostały one wykonane przez habilitanta. Jest to tym bardziej ważne, że współautorami są fizycy o ustalonej renomie i znacznym dorobku naukowym. Obaj współautorzy prac: profesorowie Bogdan Bułka i Arturo Tagliacozzo zgodnie podkreślają wiodącą rolę dra Stefańskiego w wykonaniu obliczeń analitycznych i numerycznych oraz, za wyjątkiem pracy nr I, jego inspirującą rolę w sformułowaniu problemu badawczego. Dodatkowe informacje

uzyskamy szczegółowo analizując cały materiał, a więc publikacje, w szczególności jednoautorskie, wprowadzenie do habilitacji i pozostały dorobek naukowy.

Rozpocznę od 'wprowadzenia' do habilitacji. Jest to 34-stronicowy artykuł, w którym zawarte są niezbędne informacje wstępne oraz podsumowanie wyników opublikowanych w pracach wchodzących w zakres habilitacji. Ocena tego tekstu wypada pozytywnie, ale nie mogę się powstrzymać od dokonania następujących uwag bardziej szczegółowych, w tym także krytycznych:

- pod względem merytorycznym jest to dobry, logicznie poprawnie skonstruowany artykuł. Autor prowadzi czytelnika poprzez zagadnienia badane w kolejnych pozycjach habilitacji omawiając związki pomiędzy nimi, motywy podjęcia kolejnego zadania badawczego itd. Wyraźnie widać logikę rozumowania i potwierdzenie starej zasady, że rozwiązanie pewnego problemu pozwala na postawienie nowych pytań i uzyskanie nowych ważnych wyników.
- pod względem redakcyjnym można mieć do tego tekstu sporo zastrzeżeń – począwszy od zdań niegramatycznych lub nawet nielogicznych sformułowań (str. 7 „ograniczone potencjałem prostopadłym do ...” – czy skalar może być do czegoś prostopadły). Irytująca jest przypadkowa kolejność cytowania literatury oraz formułowanie zdań jedynie w 1 osobie liczby pojedynczej i stwierdzanie, że wynik teorii późniejszej (np. z 2002 roku) został wcześniej potwierdzony doświadczalnie (w 2000 r.). Mogło się tak zdarzyć, gdyby autor pracy teoretycznej nie znał doświadczenia, ale tu mamy do czynienia z odwrotną sytuacją.

Przejdę teraz do krótkiej charakterystyki najważniejszych wyników uzyskanych w poszczególnych publikacjach habilitacyjnych. Jak już wcześniej wspomniałem, kluczowa w dorobku habilitacyjnym dra Stefańskiego jest praca nr I z Phys. Rev. Lett. (2001). To tam pojawiła się oryginalna idea, że za kształt linii typu Fano odpowiada wielociałowy stan prowadzący do rezonansu Abrikosova-Suhla. Jednym z najważniejszych wyników tej pracy i motywem przewodnim całej rozprawy jest analiza wpływu zjawiska Kondo na zjawisko Fano. Dogłębna analiza tego wpływu w geometrii zbliżonej do oryginalnych prac Fano jest tematem monautorskich prac II i III opublikowanych w Solid State Commun. (2003) i Acta Physica Polonica. W pracach tych autor badał przewodność elektryczną układu składającego się z drutu jednowymiarowego w obecności kropek kwantowych umieszczonych w jego pobliżu. Założono skończone prawdopodobieństwo przeskoku elektronu z kropki na drut oraz występowanie korelacji elektronowych w kropkach. Rozwiązanie problemu wielociałowego w ramach przybliżenia interpolacyjnego (pomiędzy granicą atomową a przybliżeniem SOPT) pozwoliło zbadać wpływ zjawiska Kondo w kropkach na przewodnictwo elektryczne drutu i rezonans Fano. Autor analizował zachowanie układu w zależności od parametrów kropek i temperatury.

Transport elektronowy przez duże kropki kwantowe badany jest w pracach IV, V i VII. W takich kropkach odległości pomiędzy dyskretnymi poziomami energetycznymi są mniejsze niż ich poszerzenie związane ze sprzężeniem z elektrodami. W pracy IV rozważano dwuwymiarową kropkę kwantową z silnymi korelacjami elektronowymi i efektywnym oddziaływaniem pomiędzy poziomami

indukowanym sprzężeniem z elektrodami. Ten prosty model prowadzi do przesunięcia maksimum przewodności różniczkowej do niezerowych wartości napięcia pomiędzy elektrodami. Efekt taki widoczny był w doświadczalnych pracach J. Schmida i innych. Wielopoziomowa kropka kwantowa umieszczona pomiędzy dwiema elektrodami i silnie z nimi sprzężona jest tematem kolejnej pracy publikowanej w Phys. Rev. Lett. Autorzy założyli, że tylko jeden poziom energetyczny jest hybrydyzowany z zewnętrznymi elektrodami, natomiast wszystkie inne są związane ze stanami silnie zlokalizowanymi wewnątrz kropki i stanowią centra rozpraszające modyfikujące właściwości rezonansu Kondo. Ponieważ efektywność rozpraszania zależy od odległości takiego poziomu od poziomu Fermiego na krzywej przewodności w funkcji napięcia bramki (przesuwającego wszystkie poziomy kropki względem poziomu Fermiego elektrod) pojawiają się charakterystyczne oscylacje. Są one przejawem rezonansów związanych z rozpraszaniem elektronów przewodnictwa (tunelujących przez kropkę) na zlokalizowanych poziomach w kropce.

Dokładniej rolę ładunku zgromadzonego na zlokalizowanych poziomach w kropce analizowano w pracy VII. Ładunek ten efektywnie eliminuje potencjał bramki przesuwając położenie rezonansów i wprowadza dodatkową asymetrię wierzchołków przewodności obliczonej w funkcji napięcia bramki. Niewielka reinterpretacja modelu pozwoliła autorom prac na opis zależności przewodności elektrycznej kwantowego punktu kontaktowego w obecności kropki kwantowej. Przewodność takiego punktu silnie zależy od ładunku zgromadzonego na kropce (sprężenie pojemnościowe). Ten sam model został wykorzystany w pracy VI dla objaśnienia tzw. anomalii 0.7 w przewodności przez takie kontakty. Anomalia 0.7 polega na pojawieniu się plateau na zależności przewodności kontaktu od napięcia bramki o wartości około $0.7 \cdot (2e^2/h)$ w niezbyt niskich temperaturach. Dr Stefański w pracy VI wraz z prof. Bułką przekonująco uzasadniają, że charakterystyczny schodek i jego zależność od temperatury związane są z pojawieniem się rezonansu Kondo w kontakcie.

Podsumowując należy stwierdzić, że prace wchodzące w skład habilitacji zawierają parę bardzo dobrych objaśnień nieoczekiwanych, bądź wcześniej niejasnych zachowań przewodności elektrycznej przez nanostruktury składające się z kropki kwantowej i, ewentualnie, kwantowego punktu kontaktowego umieszczonych pomiędzy zewnętrznymi elektrodami. Bardzo dobre zrozumienie problemu doświadczalnego uzupełnione wystarczająco dokładnym rozwiązaniem wielociałowego hamiltonianu Andersona zaowocowało nietrywialnymi wynikami, które odbiły się jak już wspominałem, szerokim echem w literaturze przedmiotu. Osobiście za najciekawsze rezultaty pracy habilitacyjnej uważam:

- opis roli rezonansu Abrikosova-Suhl'a w pojawieniu się zjawiska Fano i jego modyfikacji,
- analizę wpływu blisko siebie położonych poziomów kropki na pojawienie się anomalnego zjawiska Kondo w przewodności (z przesunięciem maksimum przewodności do niezerowych wartości napięcia V_{SD} (źródło-dren)),
- opis anomalii 0.7 w kwantowym kontakcie punktowym jest także sporym osiągnięciem, choć model zakładający istnienie poziomu rezonansowego w takiej strukturze jest, moim zdaniem nieco słabiej uzasadniony mimo, że obliczenia i wyniki są przekonujące.

Liczba prac na temat zjawisk transportu przez kropki kwantowe jest bardzo duża i uzyskanie liczących się wyników jest trudne, szczególnie dla teoretyków bezpośrednio nie współpracujących z grupami doświadczalnymi, co dodaje dodatkowej wagi osiągnięciom dr Stefańskiego.

Pełna lista publikacji dra Piotra Stefańskiego zawiera 46 pozycji. Z tego 17 prac zostało opublikowanych przed doktoratem obronionym w grudniu 1991 roku. Dorobek naukowy uzyskany po doktoracie, a niewchodzący do habilitacji, na który składają się 23 publikacje związany jest z doświadczalnym badaniem magnetycznych właściwości różnego rodzaju związków ziem rzadkich z metalami przejściowymi i ich teoretyczną analizą. Prace te były publikowane m.in. w J. Magn. Magn. Materials (5), physica status solidi (3), Acta Physica Polonica (4), J. Alloys and Compounds (2) i IDEE Transactions on Magnetism (2) etc. Dr Stefański badał m.in. wpływ podsięci krystalicznych na magnetyczną anizotropię związków z żelazem, cynkiem i manganem. Ten dorobek jest bardzo obszerny ilościowo oraz dotyczy tematyki bardzo różnej od tej w pracy habilitacyjnej. Jak sam autor pisze w autoreferacie, badając właściwości magnetyczne międzymetalicznych związków ziem rzadkich zainteresował się rolą silnych korelacji i ich opisem w ramach formalizmu funkcji Greena. To doprowadziło go do zajęcia się nanostrukturami, w których korelacje elektronowe szczególnie dramatycznie się manifestują i nie mam wątpliwości, że znalazł się na właściwej ścieżce rozwoju, gdyż w tej tematyce porusza się bardzo sprawnie, a prace wchodzące w zakres habilitacji z pewnością stanowią grupę najlepszych jego prac. szybkiego pewnością do tak szybkiego wejścia w tę nowoczesną tematykę dobrze przyczyniła się ścisła współpraca z prof. Bogdanem Bułką, znanym nie tylko w Kraju specjalistą fizyki układów mezoskopowych i nanoskopowych.

Dr Stefański jest aktywnym fizykiem. Wielokrotnie uczestniczył w krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych (6 razy przed doktoratem i 26 po doktoracie) i przynajmniej sześciokrotnie wygłaszał referaty zapraszone. Czterokrotnie był głównym wykonawcą lub wykonawcą w grantach KBN kierowanych przez profesorów A. Wrzeciono, J. Baszyńskiego, B. Bułkę i J. Barnasia. Przebywał na rocznym stażu i stypendium Aleksandra von Humboldta w Dreźnie i na dwu jednomiesięcznych stażach w Neapolu. Współpracuje z prof. Arturo Tagliacozzo z Neapolu oraz prof. Rolfem Haugiem z Uniwersytetu w Hanowerze. Dwukrotnie był nagrodzony za badania naukowe: w 1990 nagrodą zespołową PAN, a w 1991 nagrodą Dyrektora IFM PAN za pracę doktorską.

Jak wynika z tego pobieżnego omówienia osiągnięć naukowych dr Piotr Stefański jawi się jako dojrzały fizyk o szerokich horyzontach, dużym doświadczeniu, obszernym dorobku naukowym, sprecyzowanej i nowoczesnej tematyce badawczej i dobrym warsztacie obliczeniowym. Wyniki osiągnięte w pracy habilitacyjnej istotnie poszerzają naszą wiedzę w tej bardzo aktualnej tematyce o potencjalnie ważnych zastosowaniach w mikroelektronice.

Reasumując, interesujące i szeroko cytowane wyniki osiągnięte w habilitacji, obszerny dorobek naukowy niewchodzący w zakres habilitacji i aktywność naukowa uzasadniają, moim zdaniem, stwierdzenie, że spełnione zostały wymagania stawiane rozprawom habilitacyjnym i wnioskuję o dopuszczenie dra Piotra Stefańskiego do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

