

**Recenzja pracy doktorskiej**  
**mgra Damiana Krychowskiego**  
**pt. „Analiza wpływu silnych korelacji i interferencji na transport**  
**elektronowy w nanostrukturach”,**  
**przygotowanej w Instytucie Fizyki Molekularnej**  
**Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu**

Praca doktorska mgra Damiana Krychowskiego pt. *‘Analiza wpływu silnych korelacji i interferencji na transport elektronowy w nanostrukturach’*, przygotowana w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN pod kierunkiem docenta Stanisława Lipińskiego, składa się z krótkiego wstępu, pięciu rozdziałów i podsumowania. Rozdział pierwszy oparty jest w całości na literaturze. W pierwszej części zawiera on wprowadzenie do fizyki układów mezoskopowych i jednocześnie definiuje podstawowe parametry służące do ich opisu. Dalsza część tego rozdziału zawiera przegląd eksperymentalnych wyników dotyczących transportu elektronowego w obszarze Kondo oraz efektów interferencyjnych w kropkach kwantowych. Autor skoncentrował się głównie na spinowym, orbitalnym i spinowo-orbitalnym efekcie Kondo w półprzewodnikowych kropkach kwantowych oraz dużych molekułach. Rozdział ten stanowi również dobry przegląd literatury, zwłaszcza tej dotyczącej eksperymentalnej strony zagadnienia. Omówienie literaturowych wyników eksperymentalnych na początku pracy ma tę zaletę, że pozwala w dalszej części lepiej kontrolować wyniki teoretyczne i ich związek z eksperymentem, ułatwiając tym samym interpretację uzyskanych rezultatów. W rozdziale tym Autor pracy wykazał się również dobrą znajomością problematyki transportu elektronowego w układach nanoskopowych, w szczególności transportu ładunkowego i spinowego przez kropki kwantowe i molekuły.

Rozdział drugi poświęcony jest krótkiemu przeglądowi metod teoretycznych stosowanych w pracy, w szczególności metody nierównowagowych funkcji Greena, metody równania ruchu (EOM), metody pomocniczych bozonów (w przybliżeniu pola molekularnego), oraz przybliżenia znanego jako NCA (Non-Crossing Approximation). W ramach metody EOM Autor korzysta z rozszczepienia wprowadzonego przez Lacroix. Jeśli chodzi wyznaczenie funkcji korelacyjnej  $G^<$  to stosuje przybliżenie Ng. Tutaj można było w

pracy odnieść się trochę szerzej do samego przybliżenia Ng jak i do warunków jego stosowalności.

Rozdział trzeci zawiera oryginalne wyniki Autora i dotyczy spinowo-orbitalnego efektu Kondo w nanorurce węglowej dołączonej do metalicznych elektrod. Założony modelowy hamiltonian, będący w zasadzie dwu-orbitalowym modelem Andersona, uwzględnia dwa stany orbitalne ( $m=\pm 1$ ) i dwa stany spinowe ( $s=\pm 1$ ). Takie same stany wprowadzone zostały dla elektrod a oddziaływanie hybrydyzacyjne założono tylko między stanami o tych samych liczbach kwantowych  $m$  i  $s$ . Uzyskane rezultaty jasno pokazują wielociałowy rezonans Kondo w transmisji (przewodności). Również zależność przewodności liniowej od napięcia bramkowego (rys.3.3) jest jakościowo zgodna z eksperymentem, co jest faktem godnym podkreślenia - podnosi to bowiem wartość i znaczenie wyników uzyskanych w pracy.

W rozdziale trzecim autor bada również wpływ pola magnetycznego na transport w reżimie Kondo. Rozważa przypadek zarówno pola magnetycznego wzdłuż osi nanorurki jak i pola prostopadłego do tej osi. Ciekawe porównanie z wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi w pracach Jarillo-Herrero i inni (Ref. [5]) oraz Makarovski i inni (Ref. [38]) znajduje się na rys. 3.7. Istnieje dobra jakościowa zgodność między obliczeniami a eksperymentem, co wskazuje na poprawność przyjętego modelu i jego parametrów. W rozdziale tym autor bada również efekt Kondo w przypadku nanorurki dołączonej do magnetycznych elektrod. Wpływ spinowej polaryzacji elektrod uwzględniony jest poprzez efektywne rozszczepienie poziomu nanorurki, co w ogólności prowadzi do redukcji przewodności w obszarze Kondo.

Innym problemem badanym w rozdziale trzecim jest wpływ realnych procesów odwrócenia spinu (tzw. spin-flip) w nanorurce na przewodność w reżimie Kondo. Procesy takie mogą zachodzić dzięki oddziaływaniu z magnetycznymi defektami lub w wyniku sprzężenia spinowo orbitalnego. Autor zbadał wpływ tych procesów na przewodność, tunelowy magnetoopór, jak również na prąd spinowy (spinową polaryzację prądu). Autor pokazał, że procesy spin-flip mają dość istotny wpływ na wspomniane wyżej charakterystyki, prowadząc, w zależności od zakresu przyłożonego napięcia, albo do zmniejszenia wartości TMR i spinowego prądu lub do ich wzrostu.

Rozdział czwarty dotyczy efektów interferencyjnych w transporcie przez kropki kwantowe w reżimie Kondo. Chodzi tutaj głównie o efekty wynikające ze sprzężonych rezonansów Kondo i Fano. Tak jak rezonans Kondo pojawia się już w transporcie przez pojedynczą kropkę – w tym przypadku jednopoziomową – efekt Fano pojawia się gdy



występuje interferencja fal elektronowych przechodzących przez dwa różne kanały. Autor rozpatruje kilka geometrii w których występują efekty związane z konkurencyjnym wpływem na transport rezonansu Kondo i efektu Fano. Między innymi rozpatruje układ złożony z jednej kropki kwantowej w układzie rezonatora, układ złożony z kropki kwantowej i mostka łączącego bezpośrednio elektrody, jak również układy złożone z dwóch kropek kwantowych. Dodatkowo w niektórych przypadkach włącza zewnętrzne pole magnetyczne, które prowadzi do efektu interferencyjnego znanego jako efekt Aharonova-Bohma. W przypadku tym mamy właściwie konkurencyjny wpływ trzech efektów – Aharonova-Bohma, Fano i Kondo. Stosując metodę pomocniczych bozonów Autor wyznaczył przewodność badanych układów. Niektóre wyniki porównał z literaturowymi wynikami otrzymanymi inną metodą, mianowicie metodą numerycznej grupy renormalizacji (rys.4.4), uzyskując zadowalającą zgodność jakościową.

Rozdział piąty obejmuje badania szumu ziarnistego, nazywanego często również szumem śrutowym. Ten typ szumu jest konsekwencją ziarnistej natury ładunku elektrycznego – ładunek elektronu jest minimalnym kwantem ładunku. Stosując tę samą technikę bozonów pomocniczych, co w przypadku wyznaczania przewodności układu, Autor policzył współczynnik Fano  $F$ . Współczynnik ten określa wielkość szumu względem szumu poissonowskiego. Szczególnej uwagi, zwłaszcza przy interpretacji wyników, wymaga zakres małych napięć, gdzie dominuje szum termiczny typu Nyquista-Johnsona. Wartość współczynnika Fano dla szumu ziarnistego powyżej  $F=1$  określa tzw szum super-poissonowski, podczas gdy obszar  $F<1$  opisuje szum sub-poissonowski. Dla rozpatrywanych modeli i założonych parametrów Autor rozprawy uzyskał szum sub-poissonowski, wskazujący na korelacje kwantowe i ładunkowe w układzie prowadzące do zmniejszenia szumu. Szczególnie widoczne jest to w obszarze Kondo (np. rys. 5.3c). Problemem otwartym jest to czy metoda bozonów pomocniczych opisuje szum ziarnisty poprawnie. Tutaj Autor robi porównanie wyników uzyskanych różnymi stosowanymi przez niego metodami (rys. 5.3a), które wskazują na pewne różnice.

Ostatni rozdział pracy to krótkie podsumowanie i zestawienie najważniejszych wyników uzyskanych w rozprawie doktorskiej. Poza tym, praca zawiera obszerną literaturę (129 pozycji) dotyczącą transportu przez kropki kwantowe i molekuly. To z kolei wskazuje na dobrą orientację Autora w zagadnieniach związanych z tematyką pracy. Znajduje się tutaj również spis prac, w których Autor rozprawy jest współautorem (10 prac opublikowanych i dwie wysłane).

Praca napisana jest poprawnym językiem. Zredagowana jest również starannie. Autor nie ustrzegł się jednak drobnych usterek. I tak na stronie 9 (pierwsze zdanie w części 1.1) Autor pisze 'W układach makroskopowych nie ujawniają się efekty związane z falową naturą elektronów .....'. Myślę, że tutaj Autor trochę zbyt mocno ograniczył się tylko do pewnych zjawisk kwantowych. Na stronie 10 (linia 7 od dołu) Autor pisze: 'Jeżeli rozmiar układu jest mniejszy od długości fali Fermiego .... to w układzie zachodzi kwantowanie rozmiarowe.' Ten warunek też jest zbyt ostro sformułowany. Również na stronie 11 omawiając zjawisko dyskretnego ładowania pojedynczymi elektronami Autor stwierdza, że pojemność kropki jest bardzo mała czemu odpowiada duża energia ładowania  $e^2/2C$ , przy czym  $C$  oprócz pojemności kropki zawiera także pojemności źródła drenażu i bramki. Pojemność elektrod jest bardzo duża, gdyby więc było tak jak Autor pisze, nie byłoby efektów dyskretnego ładowania w kropkach. Są to jednak usterki nie mające żadnego wpływu na uzyskane wyniki i na moją pozytywną ocenę pracy. Autor uzyskał wiele interesujących rezultatów. Z ważniejszych i najciekawszych moim zdaniem wyników wymienilibym rezultaty dotyczące efektu Kondo dla symetrii  $SU(4)$ . Tutaj autor otrzymał dobrą zgodność jakościową z eksperymentalnymi wynikami uzyskanymi przez innych autorów. Również interesujące są rezultaty dotyczące korelacji efektów kulombowskich i interferencyjnych.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że praca napisana jest poprawnym językiem. Nie zauważyłem w niej jakichś poważniejszych uchybień. Autor pokazał, że dobrze panuje nad tematyką rozprawy, o czym pośrednio świadczy również bogato cytowana literatura. Tematyka ta mieści się w nurcie aktualnych badań w zakresie układów nanoskopowych. W pracy Autor przedstawił kilka interesujących wyników. Najważniejsze z nich zostały już opublikowane w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Godnym podkreślenia jest fakt, że Autor rozprawy starał się trzymać blisko literaturowych wyników eksperymentalnych i udało mu się część z nich jakościowo odtworzyć. Biorąc to wszystko pod uwagę stwierdzam, że praca doktorska mgra Damiana Krychowskiego spełnia ustawowe wymagania. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie do dalszych etapów postępowania. Ponadto, biorąc pod uwagę wartość wyników prezentowanych w pracy jak również fakt, że Autor stosował zaawansowane metody teoretyczne, uważam, że praca doktorska mgra Damiana Krychowskiego zasługuje na wyróżnienie.

Poznań, dnia 4 maja 2010r.

Józef Barnaś

