

INSTITUTE OF MOLECULAR PHYSICS

POLISH ACADEMY OF SCIENCES

POZNAŃ, POLAND

DOCTORAL THESIS

Quantum entanglement, Kondo
effect, and electronic transport in
quantum dots system

Author:

SAHIB BABAEE TOOSKI

Supervisor:

PROFESSOR BOGDAN R. BUŁKA

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy in Physics*

September 2014

Abstrakt

Rozprawa doktorska przedstawia badania splątania kwantowego, efektu Kondo i transportu elektrycznego w układzie kropek kwantowych przy pomocy metody numerycznej grupy renormalizacji. Na początku przedstawiono wyniki dla trójkątnej molekuly zbudowanej z koherentnie sprzężonych kropek kwantowych. Następnie rozważano pojedynczą kropkę kwantową połączoną z elektrodami uwzględniając przy tym procesy skorelowanego przeskoku elektronów.

Pierwsza część Rozprawy przedstawia badania układu trzech sprzężonych kropek kwantowych z trzema elektronami, gdzie jedną z kropek podłączono do metalicznych elektrod. Układ został opisany Hamiltonianem Andersona dla trzech domieszek. W tej części pracy skoncentrowano się na dwu-spinowym splątaniu kwantowym w układzie trzech spinów i jego relacji z własnościami termodynamicznymi i transportowymi. Pokazano, że oba efekty wielociałowe, to jest efekt Kondo i oddziaływanie wymienne między kropkami, konkurują ze sobą. Połączenie układu trzech kropek kwantowych z elektrodami prowadzi do utworzenia stanu singletowego Kondo, który może zmieniać splątanie. Związane jest to ze współzawodnictwem między-kropkowych korelacji spinowych oraz korelacji typu Kondo. Przeprowadzono analizę ilościową kwantowego przejścia fazowego pomiędzy niesplątanymi a splątanymi stanami oraz przedstawiono odpowiedni diagram fazowy, który opisano wspomagając się ścisłymi rozwiązaniami dla cztero-spinowego modelu. Mimo, że praca koncentruje się na układzie kropek kwantowych, model ten jest bardziej ogólny i może być wykorzystany także do badań efektu Kondo w molekułach o trójkątnej symetrii.

Druga część Rozprawy rozszerza badania własności transportowych trzech kropek kwantowych na wszystkie możliwe obsadzenia układu elektronami. Badania pokazują wielociałowe cechy stanu podstawowego, które manifestują się w przewodności elektrycznej. Własności transportowe zostały opisane przez regułę sum Friedela-Luttingera, która ma zastosowanie zarówno dla normalnego jak i osobliwego stanu cieczy Fermiego. Reguła sum Friedela-Luttingera wiąże przewodność

elektryczną z ładunkiem domieszki i całką Luttingera. Pokazano, że całka Luttingera jest równa zero dla fazy normalnej oraz $\pi/2$ dla fazy osobliwej cieczy Fermiego. Skupiono się głównie na wpływie korelacji elektronowych i formowaniu się stanu wielociałowego oraz ich roli w transporcie elektrycznym. Szczegółowa analiza funkcji korelacji spinowych i przewodnictwa elektrycznego dostarcza informacji o stanie podstawowym, w szczególności o formowaniu się lokalnego momentu magnetycznego oraz związanego z nim kwantowego przejścia fazowego, które oddziela fazę normalną i osobliwą cieczy Fermiego. Interesującym wynikiem Rozprawy jest pokazanie efektu Kondo związanego z częściowym ekranowaniem spinu $S = 1$.

Ostatnia część Rozprawy przedstawia badania przewodności elektrycznej i siły termoelektrycznej pojedynczej kropki kwantowej sprzężonej z elektrodami. Układ został opisany za pomocą rozszerzonego modelu Andersona dla domieszki, w którym uwzględniono procesy skorelowanego przeskoku (tzn. kiedy tunelowanie jest zależne od obsadzenia kropki kwantowej). Badania przewodności elektrycznej i siły termoelektrycznej zostały przeprowadzone dla różnych zakresów napięcia bramki i temperatury. Pokazano, że procesy skorelowanego przeskoku prowadzą do zmiany położenia i szerokości poziomów, łamią symetrię elektron-dziura, zmieniają temperaturę Kondo oraz silnie wpływają na przewodnictwo elektryczne i siłę termoelektryczną. Procesy skorelowanego przeskoku mogą prowadzić do anomalii w obszarze mieszanej walencyjności, w szczególności powodować silny wzrost współczynnika Seebecka.