

dr hab. Adam Rycerz

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie  
Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego  
Zakład Teorii Materii Skondensowanej  
i Nanofizyki

email: [rycerz@th.uj.edu.pl](mailto:rycerz@th.uj.edu.pl)

www: <http://th.if.uj.edu.pl/~adamr/>

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Macieja Poniedziałka “*Siła Lorentza w transporcie ładunku przez pierścienie kwantowe*”.**

Pracę doktorską mgr. Macieja Poniedziałka stanowi zbiór siedmiu artykułów opublikowanych w wysokiej rangi czasopismach fizycznych, tj. *Physical Review B*, *Journal of Physics: Condensed Matter* (po 3 prace) oraz *Europhysics Letters* (1 praca), poprzedzony wstępem i wzbogacony uzupełnieniami zredagowanymi przez Autora. Załączone oświadczenia współautorów, Prof. Francois Peetersa i dr. hab. inż. Bartłomieja Szafrana (*promotora rozprawy*), nie pozostawiają wątpliwości że wkład pracy Autora rozprawy w badania opisane w wymienionych artykułach był znaczący, a nierzadko wiodący. Ma to również odzwierciedlenie w pierwszej pozycji na liście autorów czterech spośród siedmiu wspomnianych artykułów.

Z całą pewnością, dorobek naukowy mgr. Macieja Poniedziałka na tak wczesnym etapie kariery naukowej znacząco przewyższa wymagania stawiane autorom rozpraw doktorskich. W dalszej części recenzji podsumuję osiągnięcia poznawcze poszczególnych prac składających się na Rozprawę; postawię także wniosek o jej wyróżnienie.

Punktem wyjścia dla badań przedstawionych w Rozprawie było spostrzeżenie, iż obserwowany w eksperymentach zanik amplitudy oscylacji prądu płynącego w mezoskopowym pierścieniu Aharonowa-Bohma (A-B), związany z wnikaniem pola magnetycznego do ramion pierścienia, może być mylnie interpretowany jako przejaw zaniku koherencji kwantowej. W istocie, czynnikiem wystarczającym do wyjaśnienia zaniku oscylacji jest zakrzywienie trajektorii elektronów związane z działaniem tytułowej siły Lorentza, które powoduje nierównowagę możliwych dróg (ramion pierścienia) ruchu elektronów i osłabienie efektów interferencji kwantowej także w warunkach idealnej koherencji stanów. Precyzyjne rozróżnienie wymienionych zjawisk wymaga zastosowania układu doświadczalnego złożonego z pierścienia i trzech doprowadzeń. Symulacje numeryczne przepływu ładunku elektrycznego przez taki układ w temperaturach bliskich zera absolutnego były tematem większości prac stanowiących Rozprawę. Dla lepszego zrozumienia fizyki obserwowanych zjawisk rozważano także prostszy układ, złożony z drutu kwantowego i bocznie wpiętego pierścienia A-B, przy różnych konfiguracjach połączenia drutu i pierścienia.

Celem pierwszego artykułu [wg notacji Autora: A.1] było wyjaśnienie rozbieżności pomiędzy wynikami prowadzonych wcześniej prac teoretycznych i doświadczalnych dotyczących transportu ładunku przez pierścień mezoskopowy z trzema końcówkami, które to rozbieżności pojawiały się w zakresie niskich pól magnetycznych. Stosując metodę rozwiązywania zależnego od czasu równania Schrödingera poprzez symulację propagacji pakietów falowych pokazano, że lokalne zaburzenie potencjału elektrostatycznego (centrum rozpraszania) obecne w jednym z ramion pierścienia może prowadzić do obserwowanej w doświadczeniu redukcji amplitudy oscylacji A-B. Autor wiąże to z faktem, iż transmisja ładunku odbywa się w najniższym podpaśmie energetycznym pierścienia (obecność podpasm wynika z kwantyzacji poprzecznej ruchu elektronu), w którym energia kinetyczna elektronów na poziomie Fermiego jest relatywnie mała. Innymi słowy, obserwowane wcześniej odstępstwa wyników doświadczalnych od przewidywań teoretycznych udało się wyjaśnić w ramach opisu rozpraszania elastycznego, bez odwoływania się do procesów dekoherencji.

W drugiej pracy [A.2] kontynuowano badania przepływu ładunku przez pierścień A-B z trzema doprowadzeniami, tym razem rozwiązując równanie Schrödingera metodą różnic skończonych dla przypadku rozpraszania monoenergetycznego (także z uwzględnieniem efektów rozmycia termicznego). Nowym wynikiem (w zestawieniu z wcześniejszymi symulacjami dla pakietów o skończonej szerokości energetycznej) jest bez wątpienia obecność - w silnych polach magnetycznych - wąskich przedziałów energii, dla których przepływ ładunku okazuje się być anomalny (tj. nie-klasyczny). Prąd wirowy w pierścieniu krąży wówczas w kierunku przeciwnym do wymuszanego siłą Lorentza, a wyjaśnienia zjawiska należy szukać w efektach superpozycji fali biegnącej i odbitej każdym z ramion pierścienia, która ma charakter konstruktywny w sytuacji, gdy energia stanów rozproszonych (energia Fermiego) jest bliska energii stanów zlokalizowanych (rezonans Fano). Szczegółowa analiza tego zjawiska jest także przedmiotem prac [A.3] i [A.4]. Pokazano w szczególności, że szerokość rezonansu (czas życia stanu zlokalizowanego) jest zdeterminowana przez siłę Lorentza. Warto także wspomnieć, iż niewielkie rozmycie termiczne energii elektronu okazuje się wystarczające, aby doprowadzić do zaniku przedziałów anomalnej transmisji.

W kolejnej pracy [A.5] uogólniono dyskusję na przypadek wyższych energii, dla których konieczne jest uwzględnienie rozpraszania elektronów pomiędzy podpasмами pierścienia. Okazuje się, że współistnienie oscylacji A-B i wyraźnych efektów lorentzowskiego zakrzywienia trajektorii jest możliwe jedynie dla elektronów w najniższym podpaśmie. Dla wyższych podpasm widoczne stają się albo efekty lorentzowskie bez periodycznych oscylacji (szeroki pierścień), albo oscylacje A-B bez magnetycznego zakrzywienia trajektorii (wąski pierścień). Wyniki pracy [A.5] wydają się niezwykle istotne i nawiąże do nich jeszcze w dalszej części recenzji.

Prace [A.6] i [A.7] dotyczą pokrewnego zagadnienia dynamiki pojedynczego elektronu w wąskim kanale, sprzężonego pojemnościowo z innym elektronem uwięzionym w pierścieniu mezoskopowym. Pokazano, że procesy rozpraszania nieelastycznego, podczas których zachodzi transfer krętu pomiędzy elektronem w pierścieniu a elektronem w kanale, prowadzą do łamania relacji Onsagera  $G(B)=G(-B)$ , gdyż amplituda prawdopodobieństwa dla takich procesów nie jest parzystą funkcją pola magnetycznego (obecność pola preferuje określoną zmianę momentu orbitalnego elektronu w pierścieniu). Praca [A.7], oparta na oryginalnym pomysle Autora rozprawy, prezentuje możliwość wyłączenia rozpraszania nieelastycznego (a tym samym przywrócenia relacji Onsagera) przez wprowadzenie do układu filtru energii w postaci pary barier potencjału.

Biegłość Autora rozprawy w posługiwaniu się współczesnymi metodami numerycznymi symulacji transportu kwantowego elektronów w heterostrukturach półprzewodnikowych robi spore wrażenie. W wymienionych siedmiu pracach, Autor posługiwał się metodą symulacji propagacji pakietów falowych (o niezerowym spektrum energii), iteracyjną metodą różnic skończonych dla przypadku wiązek monoenergetycznych, stosował metodę analizy fouriera dla macierzy przewodnictwa pierścienia A-B z trzema doprowadzeniami, wreszcie dyskutował (dla przypadku uwzględniającego sprzężenie ładunkowe) rozwinięcie dwuelektronowej funkcji falowej w bazie funkcji własnych elektronu w pierścieniu. Stosowane metody numeryczne zostały dość jasno opisane w *Uzupełnieniach* załączonych do Rozprawy. Niestety, uwaga ta nie dotyczy metody stosowanej do opisu elektronu w wąskim kanale oddziałującego ładunkowo z elektronem w pierścieniu (używanej w dwóch ostatnich pracach), której przystępnego opisu ewidentnie brakuje w Rozprawie. Zakładam jednak, że podczas obrony Autor będzie w stanie odpowiednio przedstawić także i tę metodę.

Oprócz opisu metod numerycznych, *Uzupełnienia* zawierają także syntetyczny opis podstawowych własności dwuwymiarowego gazu elektronowego i koncepcji masy efektywnej, formalizmu Landauera-Büttikera, relacji Onsagera, a także dwóch zjawisk z zakresu fizyki układów mezoskopowych blisko związanych z przedmiotem Rozprawy: zjawiska ogniskowania magnetycznego i efektu A-B. Biorąc pod uwagę niewielką objętość *Uzupełnień* (30 stron), Autorowi udało się w nich zawrzeć zaskakująco wiele informacji nie tracąc przy tym przejrzystości wywodu. Wstęp historyczny dotyczący efektu A-B mógłby być jednak nieco obszerniejszy; brakuje w nim w szczególności jakiegokolwiek wzmianki o możliwości podwojenia częstości oscylacji prądu płynącego przez pierścień jako funkcji pola magnetycznego, które może zachodzić na przykład w wyniku braku koherencji faz dynamicznych, jak to miało miejsce w historycznym eksperymencie Sharvina i Sharvina z 1981 roku. (Była to zarazem pierwsza obserwacja efektu A-B dla cylindrów metalicznych.) Do tematu podwajanie częstości oscylacji powrócę jeszcze w dalszej części recenzji.

Zarówno *Uzupełnienia*, jak i dwa pierwsze rozdziały Rozprawy, zawierające opis motywacji i aktualnego stanu wiedzy w obszarze tematycznym prowadzonych badań (*Rozdział 1*), oraz syntetyczny przegląd głównych wyników wszystkich siedmiu prac składających się na Rozprawę (*Rozdział 2*), stanowią jej cenny element i ułatwiają lekturę artykułów poświęconych zagadnieniom szczegółowym. Lektura tych części byłaby jednak znacznie przyjemniejsza, gdyby Autor poświęcił nieco więcej czasu na wyeliminowanie błędów literowych i interpunkcyjnych. Dwa pierwsze rozdziały Rozprawy i *Uzupełnienia* napisane są w języku polskim, przez co wszelkie niedociągnięcia edytorskie stają się szczególnie widoczne w zestawieniu z pisanymi nienaganną angielszczyzną, starannie zredagowanymi tekstami artykułów [A.1-A.7].

Kluczowe znaczenie dla zrozumienia fizyki problemu będącego przedmiotem Rozprawy wydają się mieć wyniki opisane w artykule [A.5]. (Warto nadmienić, że wkład pracy Autora, według oświadczenia promotora, jest w przypadku tego artykułu wiodący i *przekracza 75%*.) W artykule pokazano, że współistnienie oscylacji A-B i zakrzywienia trajektorii elektronów ma miejsce jedynie w przypadku, gdy elektrony znajdują się w najniższym podpaśmie kwantyzacji poprzecznej ruchu w pierścieniu. Dla wyższych energii Fermiego, gdy obsadzone są wyższe podpasma, wspomniane efekty wykluczają się wzajemnie, mamy zatem do czynienia albo z lorentzowskim zakrzywieniem trajektorii bez periodycznych oscylacji (szeroki pierścień), albo z oscylacjami A-B bez widocznych efektów zakrzywienia trajektorii (wąski pierścień). Wydaje się, że dla dużej liczby

podpasm w wąskim pierścieniu powinien ujawniać się jeszcze inny efekt, tj. wspomniane wyżej podwajanie częstości oscylacji przewodnictwa. Można oczekiwać, że różnice faz dynamicznych elektronu w dwu ramionach pierścienia będą, w granicy dużej liczby podpasm, przypadkowe, podczas gdy różnice faz magnetycznych pozostaną dla wszystkich podpasm (w przypadku wąskiego pierścienia) takie same. W skrajnej sytuacji mogłoby prowadzić to do pojawienia się oscylacji przewodnictwa, traktowanego jako funkcji strumienia magnetycznego przechodzącego przez pierścień, z podwojoną częstością (tj. okresem  $h/2e$  zamiast  $h/e$ , podobnie jak w eksperymencie Sharvina i Sharvina z 1981 roku). W przypadkach pośrednich, analiza fourierowska magnetoprzewodnictwa powinna wskazywać wyraźne wzmocnienie drugiej składowej harmonicznej. Wydaje się, że zagadnienie podwajania częstości zasługuje na uwagę w przyszłych pracach badawczych Autora rozprawy; najprawdopodobniej konieczne będzie zwiększenie gęstości siatki przestrzennej w ramach metody elementów skończonych, tak aby możliwe było wiarygodne modelowanie zachowania elektronu wstrzykniętego do jeszcze wyższych podpasm.

Przedstawione powyżej, wyłącznie z poczucia obowiązku recenzenta, nieliczne uwagi krytyczne nie mogą jednak przesłonić zasadniczej wartości przedłożonej Rozprawy, jaką jest istotny wkład opisanych badań w zrozumienie mechanizmów rządzących efektami interferencji kwantowej w mezoskopowych pierścieniach typu Aharonowa-Bohma. Jestem przekonany, że Rozprawa z nawiązką spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr. Macieja Poniedziałka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Uważam także, że dorobek naukowy mgr. Poniedziałka, na który składa się siedem artykułów w wysokiej rangi czasopismach fizycznych (wchodzących w skład przedłożonej Rozprawy), jest zdecydowanie ponadprzeciętny i stawiam wniosek o wyróżnienie Jego Rozprawy doktorskiej.



Adam Rycerz