UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI W KRAKOWIE

INSTYTUT FIZYKI IM. MARIANA SMOLUCHOWSKIEGO
Zakład Teorii Materii Skondensowanej i Nanofizyki

dr hab. Adam Rycerz

E-mail: rycerz@th.if.uj.edu.pl
WWW: http://th.if.uj.edu.pl/~adamr/

Kraków, 11 stycznia 2020

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr Anny Dyrdał pt. *"Nierównowagowe efekty spinowo-orbitalne w układach dwuwymiarowych"*

I. Zainteresowania naukowe i całościowy dorobek habilitantki

Dr Anna Dyrdał pracuje od 2013 roku na stanowisku adiunkta na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, zaś od 2017 roku przebywa na dłuższym stażu podoktorskim w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Marcina Lutra w Halle (Niemcy). Od czasu studiów doktoranckich w UAM w Poznaniu, interesuje się zjawiskami transportu nierównowagowego ładunku elektrycznego i energii oraz towarzyszącymi im procesami akumulacji spinu w układach dwuwymiarowych, a w szczególności układach wykazujących tzw. spinowy efekt Halla, przewidziany teoretycznie przez Diakonowa i Perela w 1971 roku (nazwę wprowadził J.E. Hirsh w 1999 roku), a potwierdzony doświadczalnie przez zespoły D. Awschaloma i T. Jungwirtha w 2004 roku.

W ujęciu ilościowym, łączny dorobek naukowy habilitantki stanowi 26 artykułów w czasopismach recenzowanych, które były cytowane ponad 200 razy (czynnik Hirsha wynosi 8), oraz 2 rozdziały w książkach. Warto podkreślić, że większość publikacji dr Anny Dyrdał stanowią artukuły w renomowanych czasopismach o wysokich współczynnikach wpływu (*impact factor*), takich jak *Physical Review B* (13 prac), *2D Materials* (1 praca), czy też *Journal of Physics: Condensed Matter* (1 praca). Najczęściej cytowana praca (ponad 40 razy), opublikowana w *Physica Status Solidi — Rapid Research Letters* w 2012 roku, dotyczy spinowego efektu Halla

w silicenie i zawiera wyniki przedstawione w pracy doktorskiej pt. *Spinowy efekt Halla*, wykonanej pod kierunkiem Prof. dr hab. Józefa Barnasia i obronionej w 2013 roku. Ponadto, habilitantka wygłosiła 11 referatów na konferecjach naukowych (w tym 6 zaproszonych) i zaprezentowała 22 plakaty.

Dr Anna Dyrdał kierowała także dwoma krajowymi projektami badawczymi (Preludium i Iuventus Plus), jest także koordynatorem sieci naukowej SpinTronicFactory w UAM od 2016 roku.

Na uwagę zasługuje także ponadprzeciętna aktywność habilitantki w obszarze nauczania i popularyzacji nauki: dr Dyrdał prowadziła wykład z podstaw fizyki dla studentów Wydziału Biologii oraz liczne ćwiczenia rachunkowe, zasadniczo ze wszystkich działów fizyki; brała udział w tworzeniu laboratorium fizyki kwantowej dla studentów fizyki, jak również była koordynatorem zajęć z uczniami I LO w Lesznie.

II. Osiągnięcie naukowe będące podstawą postępowania habilitacyjnego

Recenzowana rozprawa habilitacyjna ma formę zbioru ośmiu artykułów naukowych opublikowanych w latach 2014—2017, a poświęconych opisowi teoretycznemu procesów powstawania nierównowagowej polaryzacji spinowej i konwersji spin-ładunek zachodzących w wybranych układach dwuwymiarowych. Siedem spośród wspomnianych artukułów ukazało się w czasopiśmie *Physical Review B*, zaś jeden w *2D Materials*. W siedmiu przypadkach dr Anna Dyrdał jest pierwszym autorem o wiodącym wkładzie pracy; we wszystkich przypadkach prowadziła korespondencje z redakcjami.

W ujęciu syntetycznym, przedstawiony cykl artykułów podejmuje zasadniczo trzy tematy badawcze w obszarze fizyki układów mezoskopowych:

1. *Wpływ temperatury na efekty spinowo-orbitalne:* zob. prace [H1, H2] (notacja za Autoreferatem), oraz [H4—H6]. W ramach tego zagadnienia, stosując formalizm matsubarowskich funkcji Greena, dyskutowano efekty indukowane zewnętrznym gradientem temperatury i (lub) poprzecznym polem elektrostatycznym w sytuacji nierównowagowej, tj. np. gdy przez rozważany układ dwuwymiarowy płynie zewnętrzny prąd elektryczny (lub prąd ciepła).

2. *Teoria elektrycznie i termicznie indukowanej polaryzacji w układach dwuwymiarowych z oddziaływaniem typu Raschby:* prace [H1, H2, H4, H7, H8].

W wymienionych pracach zawarto szczegółowy opis, z podaniem analitycznych rozwinięć funkcji wierzchołkowych, zachowania nierównowagowej polaryzacji spinowej układach dwuwymiarowych z oddziaływaniem typu Raschby.

3. *Wpływ efektów bliskości na procesy konwersji spinowo-ładunkowej:* zob. prace [H3, H7, H8]. Rozważano tutaj, na poziomie modeli efektywnych, grafen osadzony na odpowiednich podłożach (także magnetycznych) stawiając tezę, że grafen — co do zasady — nie musi być elementem pasywnym w układach spintronicznych, lecz może aktywnie uczestniczyć w procesach konwersji spinowo-ładunkowej, o ile tylko podłoże zaindukuje dostatecznie silne sprzężenie spin-orbita.

Z nieco innej perspektywy — jeśli skoncentrujemy się na fizycznej naturze dyskutowanych układów dwuwymiarowych — należy wskazać, że w rozprawie habilitacyjnej analizowano zasadniczo dwie klasy układów modelowych, których fizycznymi realizacjami (w eksperymentach) są:

(a) dwuwymiarowy gaz elektronowy w heterostrukturach półprzewodnikowych, dobranych tak aby oddziaływanie typu Raschby było istotne;

(b) grafen ułożony na różnych podłożach.

W przypadku (a), obecność wyrazu typu Raschby w hamiltonianie efektywnym (dla wzbudzeń niskoenergetycznych) sprawia, że elektron odczuwa efektywne pole magnetyczne proporcjonalne do kwazipędu $\propto (k_y, -k_x)$, sprzężone ze spinem 1/2 poprzez wyraz typu Zeemana. W rezultacie, jeśli dodatkowo wymuszony zostanie globalny przepływ ładunku, np. w kierunku osi x (mamy zatem $\langle k_x \rangle \neq 0$), pojawi się nierównowagowa polaryzacja spinowa w kierunku osi y. Mamy zatem do czynienia z tzw. spinowym efektem Halla. Dodatkowo, wspomniana polaryzacja spinowa może być istotnie modyfikowana w obecności otoczenia magnetycznego, np. w układach zawierających tlenki perowskitowe.

W przypadku (b), analiza teoretyczna heterostruktur na bazie grafenu rozpoczyna się od dobrze znanego hamiltonianu efektywnego typu Diraca-Weyla dla monowarstwowego grafenu, który jest kolejno uzupełniany wyrazami opisującymi możliwe efekty indukowane wpływem podłoża: potencjał alternujący pomiędzy podsieciami grafenowymi, oddziaływanie wymienne spinu i pseudospinu, oraz sprzężenie typu Raschby.

Od strony metodologicznej, podstawową techniką obliczeniową stosowaną w omawianym cyklu artykułów jest (wspomniany wyżej) analityczny formalizm matsubarowskich funkcji Greena, w ramach teorii liniowej odpowiedzi; który w pracach [H1] i [H6] został zaadaptowany do opisu przypadku, gdy efekty spinowe są wymuszone zewnętrznym gradientem temperatury.

III. Główne wyniki fizyczne i ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa niewątpliwie zawiera szereg oryginalnych wyników fizycznych dotyczących procesów nierównowagowych, a w szczególności efektów spinowo-orbitalnych w transporcie kwantowym przez układy dwuwymiarowe, na których warto skupić uwagę w postępowaniu o nadanie dr Annie Dyrdał stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Jako pierwsze, wskażę tutaj przedstawione w pracach [H5, H6] wyniki dotyczące dwuwymiarowego gazu elektronowego uwięzionego w heterostrukturach półprzewodnikowych z oddziaływaniem typu Raschby, dla którego przedstawiono opisy teoretyczne spinowych wersji klasycznych efektów Halla i Nersta.

W szczególności, w pracy [H6] dotyczącej efektu Nersta, przedstawiono spójne podejście teoretyczne umożliwiające opis zachowania spinowego przewodnictwa Nersta w niskich temperaturach. Z kolei w pracy [H5] zaproponowano pole efektywne, tzw. spinowo-zależne namagnesowanie orbitalne, które pozwoliło otrzymać fizyczne (tj. poprawne z punktu widzenia praw termodynamiki) zachowanie spinowego przewodnictwa Nersta w układzie ze skończonym gradientem temperatury.

Dalej, w pracy [H3], której tematem przewodnim jest wpływ efektów bliskości na własności układów grafenowych (a w szczególności występowanie topologicznych, spinowych i dolinowych efektów Halla) autorzy przewidują, że w układach takich — przy odpowiednio dobranych parametrach — możliwe będzie zaobserwowanie uniwersalnych (tj. danych wyłącznie przez fundamentalne stałe przyrody) wartości przewodnictwa elektrycznego oraz spinowego.

Cztery prace wchodzące w skład rozprawy [H2, H4, H7, H8] prezentują wszechstronną dyskusję polaryzacji spinowej, indukowanej przepływem prądu, w wybranych układach dwuwymiarowych. Ważnym wynikiem pracy [H2] są ogólne wyrażenia perturbacyjne na polaryzację spinową w obszarze liniowej odpowiedzi, które

można zastosować dla dowolnego układu dwuwymiarowego ze spinowymi stopniami swobody. W pracach [H2, H4, H7, H8] zaprezentowano także różne, możliwe zachowania polaryzacji spinowej jako funkcji potencjału chemicznego (w zależności m.in. od parametrów opisujących sprzężenie spin-orbita oraz tego, czy rozważany układ jest magnetyczny czy też niemagnetyczny), które są istotne z punktu widzenia zastosowań praktycznych w obszarze spintroniki.

Kolejne interesujące wyniki zaprezentowano w artykułach [H1] i [H4], w których porównano dwa mechanizmy prowadzące do pojawienia się nierównowagonej polaryzacji spinowej: elektryczny i termiczny (przez gradient temperatury). Wspomniane prace omawiają szczegółowo rolę poprawki do funkcji wierzchołkowej, związanej z rozpraszaniem na domieszkach, w kontekście opisu polaryzacji spinowej w rozważanych układach.

Warto podkreślić, że zasadnicze wyniki zawarte w pracach stanowiących rozprawę mają postać wzorów analitycznych, których poziom złożoności najczęściej wymaga jednak przeprowadzenia dyskusji numerycznej rozważanych zależności. Tak jest np. w przypadku prac [H1, H2, H4, H7] dotyczących układów magnetycznych, w których wykazano, że obecność dodatkowych (niedysypatywnych) składowych polaryzacji spinowej, które pojawiają się w obecności pola wymiennego, pozostaje w związku z własnościami topologicznymi układu, a dokładniej krzywizną Berry'ego pasm energetycznych. Wydaje się, że wspomniane wyniki, ze względu na swój ogólny charakter, mogą mieć spore znaczenie dla przyszłych badań dynamiki magnetycznej dyskutowanych układów. Bez wątpienia cenne byłoby sprawdzenie, na poziomie symulacji komputerowej, jak rozważane odpowiedzi układu *a priori* nieskończonego są modyfikowane przez kwantowe efekty rozmiarowe w realistycznym układzie hallowskim z czterema doprowadzeniami, co można stosunkowo łatwo zasymulować w ramach podejścia Landuera-Büttikera, także poza obszarem liniowej odpowiedzi. Wspomniany problem pozostaje oczywiście poza zakresem badań opisanych w rozprawie; opisane wyżej wyniki z pewnością będą stanowiły dobry punkt wyjściowy dla takich i podobnych rozważań.

Na zakończenie tej części recenzji należy wskazać, że Autoreferat i pozostałe materiały dostarczone do oceny zostały przygotowane z dużą starannością i zawierają wyczerpujące informacje na temat dorobku naukowego i pozostałych obszarów aktywności zawodowej dr Anny Dyrdał. Chociaż we wspomnianych materiałach pojawiają się nieliczne literówki i błędy językowe wynikające zapewne z mało starannego tłumaczenia na język polski terminów angielskich, dostarczone teksty są

w przeważającej mierze napisane jasno, w sposób umożliwiający płynną lekturę i stosunkowo szybkie zrozumienie najważniejszych wyników naukowych habilitantki. Za dobrze przemyślany należy uznać w szczególności wybór 13 czytelnych rysunków przedstawionych w Autoreferacie, które dają przekrojowy obraz najważniejszych wyników fizycznych zaprezentowanych w cyklu ośmiu artykułów stanowiących oceniane osiągnięcie naukowe.

IV. Uwagi końcowe

W podsumowaniu, zarówno ranga jak i ilość wskazanych w materiałach dostarczonych przez habilitantkę oryginalnych wyników naukowych (które są zawarte w ocenianym cyklu ośmiu artykułów w czasopismach recenzowanych) z naddatkiem spełniają ustawowe wymagania stawiane osiągnięciom będącym podstawą postępowania habilitacyjnego.

Charakter szeregu spośród prezentowanych wyników (w szczególności dotyczących związku dynamiki spinowej z własnościami topologicznymi układu, czy też możliwości stosowania monowarstw grafenowych jako spintronicznych elementów aktywnych) pozwala przypuszczać, że będą one w przyszłości często cytowane w pracach dotyczących własności spintronicznych układów dwuwymiarowych.

W ujęciu ilościowym, dorobek naukowy dr Anny Dyrdał stanowi 26 artykułów cytowanych ponad 200 razy [*aktualnie, baza Web of Science wykazuje 28 artykułów, 230 cytowań, indeks h=9*], co można uznać za wartości ponadprzeciętne dla osób ubiegających się o stopień doktora habilitowanego w zakresie fizyki. Również pozostałe aspekty aktywności zawodowej dr Anny Dyrdał, w tym działalność dydaktyczna, popularyzatorska, i organizacyjna, spełniają wszelkie oczekiwania jakie można stawiać osobom na tym etapie kariery akademickiej.

Mając powyższe na uwadze, zdecydowanie popieram wniosek o nadanie dr Annie Dyrdał stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Adam Rycerz