

Sendai, 5.01.2025

Prof. dr hab. Maciej Sawicki
Instytut Fizyki PAN, Warszawa
RIEC, Tohoku University, Sendai, Japonia

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej,
pt. "*Spin-orbit driven transport effects in a two-dimensional electron gas with selected forms of Rashba and Dresselhaus spin-orbit interaction*"

Przedstawiona mi do oceny Rozprawa stanowi podsumowanie pracy mgr Anny Krzyżewskiej wykonanej pod kierunkiem dr hab. Anny Dyrdał, prof. UAM, w Zakładzie Fizyki Mezoskopowej na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Rozprawa ta została przygotowana w języku angielskim i jest zatytułowana: *Spin-orbit driven transport effects in a two-dimensional electron gas with selected forms of Rashba and Dresselhaus spin-orbit interaction*. Jest ona poświęcona teoretycznym badaniom właściwości transportowych dwuwymiarowych układów półprzewodnikowych z oddziaływaniem spinowo-orbitalnym typu Rashby i Dresselhausa, ze szczególnym uwzględnieniem ich form kubicznych. Doktorantka wykorzystwała metody teorii pola w fizyce tzw. ciała stałego, bazując głównie na formalizmie funkcji Greena z podejściem diagramowym. Głównym celem pracy była teoretyczna analiza wewnętrznego (ang. „intrinsic”) wkładu do efektów transportu elektronowego wynikającego ze struktury pasmowej badanego układu. Badania koncentrowały się na nierównowagowej polaryzacji spinowej w układzie, liniowych i nieliniowych zjawiskach transportowych wywoływanych oddziaływaniami spinowo-orbitalnymi z rodziny efektów Halla, a także ich termicznych odpowiednikach, takich jak efekt Nernsta oraz termicznie indukowanej polaryzacji spinowej. Dodatkowo zbadano wzajemne oddziaływanie między oddziaływaniem spinowo-orbitalnym a polem wymiennym w układach magnetycznych.

Rozprawa stanowi zbiór sześciu opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, których pierwszym autorem jest Doktorantka. Ma więc formę tzw. „zszywki”. Jej układ jest typowy. Rozdział 1-szy, *Introduction* (18 stron), wprowadza

czytelnika w zagadnienia stanowiące kanwę Rozprawy, przedstawia ich źródło i doniosłość we współczesnej fizyce ciała stałego, a w szczególności w jej ważnej technologicznie gałęzi: spintronice. Następnie w rozdziale 2, *Method* (10 stron), Autorka pokrótce przybliżyła nam swój warsztat pracy, stosowane metody obliczeniowe: formalizmy funkcji Greena i podejście Kubo, przedstawia podstawy podejścia diagramowego i pozostałych metod umożliwiających efektywne zmagania z postawionymi przed Nią zagadnieniami. W dwudziestostronicowym rozdziale trzecim, *Transport phenomena considered in the thesis*", zostajemy zapoznani z podstawowymi zjawiskami transportu elektronowego w ciałach stałych, w tym tak istotnymi jak zwykły (lub liniowy) efekt Halla oraz ich odmianami, czyli anomalnym i spinowym, oraz ze zjawiskami termoelektrycznymi i nieliniowymi. Zjawiska te są obecnie bardzo intensywnie badane we wiodących laboratoriach na całym świecie, gdyż oczekuje się, że po dopracowaniu, pomysły związane z tymi zjawiskami w odpowiednio dobranych układach materiałowych staną się podstawą przełomu technologicznego pozwalającego na odejście od obecnie dominującego paradygmatu krzemowej technologii CMOS i komputerowej architektury von Neumana, prowadząc do znaczącej redukcji energochłonności obecnie wykorzystywanych technologii. Istotnymi składnikami tego rozdziału są krótkie ustępy odnoszące się do najważniejszych prac badawczych związanych z poruszaną tam tematyką.

Odpowiednio przygotowani przez Doktorantkę przechodzimy do rozdziału czwartego, czyli prezentacji artykułów składających się na Dysertację. Całość jest podsumowana w następnej części *Summary*, na czterech stronach. Następnie zamieszczone są odpowiednie zgody na zaprezentowanie w ostatecznej formie wszystkich sześciu publikacji oraz oświadczenia Doktorantki, Pani Promotor i innych autorów odnoszące się do ich wkładu w powstanie tych publikacji. Na ich podstawie należy uznać, że wkład Doktorantki w powstanie wszystkich sześciu publikacji, wokół których zbudowana jest cała rozprawa, jest wiodący. Podsumowując, te sześć publikacji, a więc i cała Dysertacja, wniosły istotny wkład w rozwój dwuwymiarowej spintroniki poprzez scharakteryzowanie właściwości transportowych dwuwymiarowego gazu elektronowego z kubicznymi formami wewnętrznego oddziaływania spinowo-orbitalnego. To ważny wkład, bo większość dotychczasowych badań naukowych skoncentrowana była głównie na liniowych formach

oddziaływań spinowo-orbitalnych typu Rashby i Dresselhausa. Zamieszczone wyniki pracy Doktorantki stanowią przewodnik pozwalający na rozróżnienie form wewnętrznego oddziaływania spinowo-orbitalnego na podstawie właściwości transportowych układu, takich jak liniowe i nieliniowe efekty Halla oraz ich termiczne odpowiedniki. Rozprawa zakończona jest obszernym wyborem literatury liczącym 236 pozycji. Całość została skomponowana na 135 stronach.

Moja ocena wartości naukowej przedłożonej Dysertacji jest bardzo wysoka, jednak nie można nie wskazać podstawowego mankamentu tej nowej i coraz popularniejszej formy rozpraw doktorskich, która w zaimplementowanej przez Autorkę postaci, w mojej ocenie dość istotnie wpływa na odbiór całości. Otóż, każdy ze wstępów do załączonych publikacji w rozdziale czwartym jest zdecydowanie za krótki, wręcz lakoniczny. Jest to nie więcej niż pół standardowej strony A4, czyli w praktyce kilka zdań. Moim zdaniem, w tym właśnie miejscu Autorka powinna skierować czytelnika, w tym i recenzenta, w odpowiednie miejsca rozdziałów 2 i 3, by wskazać z jakim problemem Doktorantka się zmagала i jakich dokładnie technik używała by osiągnąć swój cel. Co musiała pokonać, co przetestować i opanować, skoro zajęło Jej to (łącznie) kilka lat. W szczególności, jako recenzent rozprawy doktorskiej, oczekuję takiego właśnie wykazania się nabywanymi umiejętnościami warsztatowymi przed lekturą każdej z publikacji, które są jednak wieloautorskie, by wiarygodnie ocenić wkład pracy Autorki, a nie gotowe już publikacje. Bo te podają tylko „wypolerowaną” syntezę, a nie wspominają i wybojach i ślepych uliczkach, których osobiście nie wierze by nie było.

Mimo tych uwag, całość oceniam bardzo wysoko, również pod względem redakcyjnym. Rozprawę czyta się dobrze, także od strony językowej. Sformułowania są jasne, język klarowny.

Oceniana Dysertacja, a przynajmniej jej części 1-3 są także pod względem formalnym przygotowane bardzo starannie. Jedynie z obowiązku recenzenckiego wspomnę, że:

- Używane stosunkowo często w Rozprawie angielskie słowo „finite”, czyli „skończony” (w sensie wielkości, rozmiaru) wbrew zwyczajowemu przypisywaniu mu znaczenia „bardzo mały” lub „niezerowy”, jest tak naprawdę antonimem słowa „infinite”.

Oczywiście, coś co nie jest nieskończone może być również bardzo małe, nawet bliskie zera, ale przy kontrastowaniu z zerem, np. z zerową temperaturą, właściwym terminem jest „nonzero” (temperature). Praktyka pokazuje, że w wielu publikacjach słowo „finite” jest używane w tym pierwszym, niepoprawnym, znaczeniu. Uważam, że obrona doktoratu to doskonała okazja, aby o tym wspomnieć.

- Na stronie 24, w zdaniu zaczynającym się od „In contrast, when the quantum well is grown in the [111] direction”, powinno chyba być „[100]”.
- Uwaga ogólna, str. 25, niezależnie co piszą autorzy pracy [80], na 100% nie wyznaczyli oni wartości parametru „gamma” z dokładnością do 4-tej cyfry znaczącej. Tzn. komputer, bo mówimy tu o wynikach obliczeń metoda „kp”, może podać nam i więcej cyfr, ale czy wszystkie parametry wejściowe były znane taką dokładnością? A przybliżenia modelowe?
- Na samym początku rozdziału trzeciego Autorka stwierdza, że „If quantities of spin-up and spin-down are equal, the system is spin-unpolarized (nonmagnetic)”. Poprosiłbym o wyjaśnienie w trakcie obrony jak w takim razie zakwalifikować antyferromagnetyki?
- Na str. 41 definiując efekty Halla Autorka podsumowuje, że: „The common thread among all these phenomena is the transverse current response to an external electric field”. Poproszę o dokładniejsze wyjaśnienie, o co Autorce chodziło w tym zdaniu.

Podsumowując, uważam, że, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Anny Krzyżewskiej prezentuje bardzo wysoki poziom naukowy. Dokumentuje bardzo bogaty materiał badawczy – obliczenia teoretyczne przeprowadzone różnymi metodami, odpowiednio dobranymi do rozwiązywanych problemów, co jednoznacznie wskazuje na wysoką sprawność warsztatową Doktorantki jako fizyka teoretyka. Omawiane badania dotyczą ważnych problemów z punktu widzenia rozwoju fizyki tej tematyki i być może wpłyną na opracowanie nowych technologii. Są oryginalne i zdecydowanie poszerzają wiedzę.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymogi formalne i zwyczajowe określone przez odpowiednie przepisy dotyczące rozpraw doktorskich. W szczególności Rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego przez Doktorantkę, wykazuje odpowiednią samodzielność i opanowanie

warsztatowe i dlatego wnoszę o dopuszczenie Rozprawy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania jej stopnia naukowego doktora nauk fizycznych, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej za wybitne osiągnięcia naukowe, do których przede wszystkim zaliczyłbym pracę A-4: A. Krzyżewska, A. Dyrdał, *Non-equilibrium spin polarization in magnetic two-dimensional electron gas with k -linear and k -cubed Dresselhaus spin-orbit interaction*, Physica E 135, 114961, opublikowanej w 2022 r. za skuteczną przeprowadzoną analizę indukowanej polaryzacji spinowej w dwuwymiarowych układach o strukturze blendy-cynkowej w postaci symetrycznych studni kwantowych otrzymanych na kierunku [001]. Jest to przykład bardzo ciekawej tematyki poruszanej przez Doktorantkę i wyników, które znajdują duże zainteresowanie w środowisku.

Maciej Sawicki