

Warszawa, 15.11.2024 r.

Dr. hab. Łukasz Kilański (prof. IF PAN)  
Instytut Fizyki PAN  
al. Lotników 32/46  
02-668 Warszawa

## 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”**

opracowania na zlecenie Rady Naukowej Dyscyplin Nauki Fizyczne i Astronomia  
Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu na podstawie  
uchwały z dnia 20 września 2024 r.

(pismo Prodziekana ds. naukowych prof. dr hab. Sławomira Breitera z dnia 30.09.2024 r.)

Rozprawa doktorska 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” wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem dr hab. Anny Dyrdał jest pracą oryginalną, która znajduje miejsce pośród aktualnych tematów poruszanych przez fizykę ciała stałego. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska podejmuje szeroko zakrojony program badań właściwości transportowych układu dwuwymiarowego gazu elektronowego w układach, w których istotny wkład daje oddziaływanie spinowo orbitalne oraz magnetyczne oddziaływanie wymiany.

Praca doktorska została zestawiona w układzie tzw. „zszywki”, w skład której weszło sześć publikacji naukowych (numerowanych w rozprawie od A1 do A6 co powiele w recenzji) opublikowanych w renomowanych czasopismach znajdujących się na liście JCR. Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej zostały w niej zamieszczone w kolejności chronologicznej względem daty publikacji w czasopiśmie w latach 2018-2024. Można domniemywać, iż doktorantka pracowała nad tematyką rozprawy przez siedem lat. Jest to dość długi czas biorąc pod uwagę to, że praca dotyczy obliczeń teoretycznych. Zwykle okres znacznie przekraczający cztery lata dotyczy prac doświadczalnych, ale nie piszę o tym, jako o negatywnym aspekcie a jedynie wskazuję na pewne dane.

Doktorantka jest pierwszą Autorką wszystkich sześciu prac wchodzących w skład rozprawy doktorskiej. Zespół współautorów prac A1-A6 jest bardzo wąski i jedynie w pracach A1 i A2 współautorem był prof. J. Berekdar z Uniwersytetu Marcina Lutra w Halle w Republice Federalnej Niemiec, a w pracy A2 współautorem jest prof. J. Barnaś. Pozostałe

prace (A3-A6) zostały opracowane przez dwoje współautorów tj. Doktorantkę oraz Promotorkę. Obecność niewielkiej liczby współautorów w pracach z zakresu fizyki obliczeniowej opartej na konkretnych układach materiałowych jest dość rzadką praktyką. Częściej niewielka liczba współautorów jest widziana w pracach dotyczących fizyki teoretycznej. Jest to związane z niemożnością podjęcia współpracy z zespołami prowadzącymi doświadczenia mogące być porównywane z pracami teoretycznymi. Niski poziom współpracy widocznej zwłaszcza w pracach A3-A6 może być oceniony negatywnie, zwłaszcza w ostatnich latach, kiedy współpraca stanowi jeden z najważniejszych elementów warsztatu pracy naukowców, do których grona Doktorantka aspiruje. Rozumiem, że praca doktorska podejmuje przeprowadzenie obliczeń analitycznych i numerycznych modelujących zjawiska fizyczne, które obserwowano doświadczalnie w szeregu układów półprzewodnikowych, ale istotnym elementem byłoby nawiązanie aktywnej współpracy z grupami badającymi doświadczalnie te zjawiska fizyczne i podjęcie działań wspierających interpretację wyników eksperymentów doświadczalnych, co skutkowałoby w mojej opinii powstaniem publikacji o wartości wyższej aniżeli prace A1-A6. Muszę jednak uszanować wybór dokonany przez Promotorkę oraz Doktorantkę i nie uważam go za negatywny – w pracach A1-A6 oraz w częściach opisowych rozprawy doktorskiej pokazano jednoznacznie odniesienia wykonanych obliczeń do wyników prac doświadczalnych i innych. Chciałbym jednak, żeby Doktorantka w trakcie obrony ustosunkowała się do ww. zarzutu. Mimo tej krytyki uważam, że nie stanowi ona jednak jednoznacznie negatywnego zarzutu – uważam jednak za o wiele bardziej wydajną bezpośrednią współpracę między fizykami doświadczalnymi oraz teoretykami.

Praca doktorska została opracowana w oparciu o 6 publikacji opublikowanych w czasopiśmie naukowych. Zamieszczono oświadczenia Edytora czasopisma Acta Physica Polonica A, w którym opublikowano pracę A1, zezwalającego na przedruk pracy A1 w rozprawie doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej. Dołączono również informację (potwierdzoną odnośnikami do stron wydawcy), iż w przypadku prac A2 oraz A6 wydawca, czyli firma Wiley, dopuszcza ich przedruk w rozprawie doktorskiej Autorki. Podobna informacja dotyczy również prac A3, A4 oraz A5, które zostały opublikowane w czasopiśmie, których wydawcą jest firma Elsevier. Praca doktorska zawiera również oświadczenia Doktorantki, Promotorki oraz współautorów publikacji dotyczące ich roli i wkładu w powstanie poszczególnych prac od A1 do A6 (patrz dodatek B, str. 116-120). W oparciu o zamieszczone oświadczenia mogę jednoznacznie stwierdzić, iż Doktorantka odegrała dominującą rolę podczas powstawania wszystkich sześciu publikacji stanowiących trzon jej rozprawy doktorskiej. Od strony ochrony praw autorskich rozprawa została w mojej opinii przygotowana poprawnie.

Pobieżny ogląd prac A1-A6 oraz wolumenów czasopism, w których zostały opublikowane, pozwala na ocenę, iż jedynie praca A1 opublikowana w czasopiśmie Acta Physica Polonica A jest pracą konferencyjną, zaś pozostałe prace (A2-A6) zostały opublikowane, jako

pełnowartościowe prace naukowe, z czego dwie prace (A2 i A6) zostały opublikowane, jako tzw. krótkie listy (z j. ang. „rapid reearch letter”) stanowiące zwykle krótsze prace przedstawiające w skondensowany sposób ważne wyniki naukowe, prace A3 i A5 zostały opublikowane, jako pełnowymiarowe artykuły naukowe w uznanym na Świecie czasopiśmie Journal of Magnetism and Magnetic Materials, zaś praca A4 o największej objętości została opublikowana w Czasopiśmie Physica E, które również jest renomowanym czasopismem w środowisku fizyków ciała stałego. Jestem trochę zdziwiony wyborem czasopism, w których opublikowano wyniki prac Doktorantki. Czy próbowano publikacji w bardziej prestiżowych czasopismach np. tych zależących do wydawcy American Physical Society? Proszę o komentarz Doktorantki na ten temat w trakcie obrony rozprawy.

Praca doktorska mgr Anny Krzyżewskiej została spisana w oparciu o wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych dotyczących szeregu fascynujących efektów fizycznych, uplasowanych jako efekty transportu nośników ładunku w układach z ograniczeniem ruchu elektronów w jednym kierunku. Układ taki, w którym elektrony mogą poruszać się jedynie w płaszczyźnie dwuwymiarowej, nazywany dwuwymiarowym gazem elektronowym, od dziesięcioleci stanowi ważny obiekt badań ze względu na manifestację różnych efektów kwantowych wpływających na transport elektronów, które zaobserwowano w kilku ostatnich dekadach. Pociągnęło to za sobą powstanie ogromnego potencjału aplikacyjnego tych efektów i układów materiałowych/urządzeń elektronicznych. Oczywiście literatura przedmiotu opisuje znaczną ilość badań teoretycznych podjętych w celu interpretacji oraz stworzenia opisu teoretycznego tych zjawisk. Jednakże, jak pokazała praca doktorska mgr Anny Krzyżewskiej istnieje jeszcze szereg luk w opisie teoretycznym tych, ogólnie przeze mnie wspomnianych zjawisk, które prace od A1 do A6 skutecznie wypełniają w kilku miejscach. Oznacza to, iż praca doktorska mgr A. Krzyżewskiej stanowi istotny element budujący szersze zrozumienie transportu elektronowego w układach dwuwymiarowych. Rozprawa ta poszerza naszą aktualną wiedzę w sposób indukcyjny a nie rewolucyjny, co obserwując brak rewolucji w fizyce od prawie stulecia nie jest uwagą negatywną a jedynie pozycjonującą pracę doktorską mgr Anny Krzyżewskiej pośród prac innych naukowców.

Redakcja rozprawy doktorskiej opartej na opublikowanych pracach naukowych jest zadaniem bardzo trudnym w szczególności w kontekście utrzymania spójności całej rozprawy oraz sensownego kierowania czytelnika przez kolejne etapy pokonywane przez Doktorantkę na drodze do rozwiązania postawionych przed nią problemów naukowych. Na tle szeregu rozpraw doktorskich, które miały formę tzw. „zszywki”, które przeczytałem w ostatnich latach praca doktorska mgr Anny Krzyżewskiej wyróżnia się pozytywnie dzięki przyjęciu bardzo spójnego podziału na rozdziały wstępne i szczegółowe, wskazujące osiągnięcia w poszczególnych poddziedzinach, oraz same prace wraz z objaśnieniami. Mam bardzo pozytywną opinię na temat konstrukcji pracy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej – po prostu dobrze się ją czytało.

Rozprawa doktorska mgr Anny Krzyżewskiej składa się z czterech głównych rozdziałów, z których pierwsze trzy stanowią tekst wprowadzający czytelnika w rozdział czwarty, zawierający przedruk artykułów od A1 do A6 wraz z wstępami oraz objaśnieniami dotyczącymi każdej z publikacji. Pracę otwiera oczywiście streszczenie w języku polskim i angielskim, a zamyka podsumowanie zawierające wnioski oraz spis literatury. Układ pracy jest odpowiedni i prawidłowo umiejscawia wiedzę czytelnika przed lekturą rozdziału czwartego, stanowiącego główną część rozprawy doktorskiej.

Praca doktorska mgr Anny Krzyżewskiej zawiera spis używanych skrótów. Niestety Doktorantka nie wykazała się wystarczającą starannością, aby lista ta była spójna w całej dysertacji. Już pobieżne spojrzenie na str. 2 i 3 pokazuje, że z jakiegoś powodu pojawia się tam skrót (SO) zamiast SOI, – czemu w polskim tłumaczeniu streszczenia tak jest? Następnym niedociągnięciem związanym z operowanymi akronimami jest podwójne oznaczenie (SOI) oraz (SOC) – chciałbym, żeby Doktorantka wyraziła podczas obrony swoją opinię na temat tego czy  $SOI = SOC$  czy może  $SOI \neq SOC$  i to zarówno w kontekście językowym jak i fizycznym. Powyższe mieszanie skrótów jest w mojej opinii zbędne. Kolejnym niedociągnięciem dotyczącym spisu akronimów jest brak skrótu QHE (zdefiniowanego na str. 44) na tej liście.

Praca zawiera dużą ilość równań matematycznych. Uważam, że w takim wypadku pomocne byłoby umieszczenie w rozprawie spisu użytych symboli. Być może wtedy Doktorantka uniknęłaby pomyłek we wzorach takich jak np. oznaczenie  $m_i$  na stronie 11, którego jednak nie ma we wzorze 1.1. Zamiast  $m_i$  mamy  $m_x$ ,  $m_y$  i  $m_z$ , które zasadniczo wystarczają do oznaczenia składowych tensora masy efektywnej. Takich przykładów jest dużo więcej, chociażby masa elektronu  $m_0$  (wzór 1.9) jest następnie oznaczona najprawdopodobniej, jako  $m$ . Znalazłem jeszcze kilka podobnych niedociągnięć. Nie oznaczają one, iż Doktorantka popełniła fundamentalne błędy w prowadzonych obliczeniach i nie jest argumentem silnie negatywnym a przytaczam te kwestie z obowiązku recenzenta. Jednak, jeśli podchodzić do rozprawy doktorskiej zgodnie z jej przeznaczeniem, jako źródła wiedzy dla czytelników to stwierdzam, że symbolika wzorów powinna być nienaganna tak, żeby przyszli czytelnicy nie mogli powielić we własnych rozważaniach podobnych błędów. Powyższe uwagi nie umniejszają mojego pozytywnego odbioru pracy i wyników zestawionych w pracy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej.

Rozdział pierwszy pracy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej zatytułowany „Wstęp” otwiera motywacja (podrozdział 1.1) do podjęcia badań. Dziwi mnie trochę, że w podrozdziale 1.1 Doktorantka nie zamieściła żadnego odnośnika literaturowego do przełomowych prac dla dziedziny. Poza tym siła argumentów tekstu stanowiącego o motywacji do podjęcia badań została rozwodniona przez części opisowe i w mojej opinii niedostatecznie mocno argumentuje za podjęciem badań. Motywacja powinna jednoznacznie wskazywać istotność i celowość badań, podczas gdy Doktorantka opisuje różne aspekty istotne dla dziedziny badań, bez wyraźnego nakreślenia ich istotności w kontekście tego, co

zostało w rozprawie doktorskiej zrobione. Idąc dalej Doktorantka w podrozdziale 1.3 opisuje szczegółowo formalizm matematyczny służący do opisu oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby oraz Dresselhaus, wpływu różnych rodzajów symetrii Hamiltonianu energii na przybliżenia umożliwiające precyzyjne obliczenia analityczne i numeryczne biorące pod uwagę ww. oddziaływanie spinowo-orbitalne. Moja ogólna ocena rozdziału pierwszego jest pozytywna.

Rozdział drugi dysertacji mgr Anny Krzyżewskiej jest poświęcony metodologii obliczeń umożliwiających takie przybliżenie, które umożliwi prawidłowe modelowanie oddziaływania spinowo-orbitalnego w półprzewodnikowych układach dwuwymiarowych. Doktorantka przyjęła w pracy metodę obliczeń polegających na zastosowaniu funkcji Greena, Greena-Matsubary oraz wzoru Kubo do obliczeń wpływu czynników zewnętrznych na transport elektronowy. Doktorantka wprowadza czytelnika w ww. formalizmy oraz wprowadza w metody związane z odmianą teorii zaburzeń zwaną „diagrammatic perturbation”. Następnie Doktorantka dyskutuje istotność użycia pojęcia energii własnej i wpływu na tą wartość różnych procesów rozpraszania elektronów w kryształach półprzewodnikowych, a także przybliżenie Borna w przypadku, gdy średnia długość fali elektronowej jest mniejsza niż średnica centrum rozpraszającego. Rozdział ten Doktorantka kończy opisując korekty związane z faktem, iż energia własna elektronu nie wystarcza do opisu oddziaływania elektronu z otoczeniem. Aby taki wkład wziąć pod uwagę w obliczeniach dokonywane są operacje renormalizacji operatorów w oparciu o tzw. „vertex correction”. Rozdział trzeci oceniam bardzo pozytywnie, szczególnie, że Doktorantka operuje złożonym aparatem matematycznym i jego zrozumienie mogłoby być trudne w przypadku, gdyby został on mniej przejrzysto przedstawiony.

Z kolei w rozdziale trzecim dysertacji mgr Anna Krzyżewska opisuje wybrane zjawiska fizyczne mające wpływ na transport elektronowy w kryształach. W szczególności w podrozdziale 3.1 opisywany jest termin polaryzacji spinowej indukowanej przepływem prądu lub też gradientem temperatury, a następnie znajduje się krótki punkt pokazujący najważniejsze osiągnięcia literaturowe dla tych zjawisk. Następnie w podrozdziale 3.2 Doktorantka opisuje liniowe efekty Halla, w szczególności anomalny efekt Halla wraz z jego dwoma głównymi mechanizmami powstawania, a następnie spinowy efekt Halla oraz punkt pokazujący najważniejsze osiągnięcia w tej dziedzinie. Podrozdział 3.3 koncentruje się na zapoznaniu czytelnika z wybranym efektem termoelektrycznym tj. anomalnym efektem Nernsta wraz z punktem wskazującym na istotne dane literaturowe dotyczące tego efektu. Kolejny podrozdział 3.4 opisuje nieliniowe efekty transportowe, w tym nieliniowy efekt Halla oraz biliniowy magnetoopór wraz z odpowiednimi podpunktami opisującymi główne osiągnięcia dla tych zjawisk. Moja ogólna ocena tej części pracy doktorskiej jest pozytywna, ale mam pewien niedosyt odnośnie wybiórczego doboru zjawisk, które zostały przedstawione. Jest to z jednej strony zrozumiałe ze względu na tematykę pracy oraz konieczność ograniczenia jej objętości, zaś z drugiej strony byłoby istotne dla przyszłych czytelników

rozprawy, aby zobaczyć pewien skrótowy przegląd efektów transportowych w półprzewodnikach stanowiących krótki przewodnik po tych zjawiskach poczynając od efektów klasycznych po kwantowe. Jest to jednak moja subiektywna ocena wynikająca z tego, że taki dobór treści dałby mniej doświadczonym w tej dziedzinie czytelnikom więcej informacji na temat złożoności tej dziedziny badań fizyki ciała stałego.

Następnie przejdę do omówienia rozdziału czwartego rozprawy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej zawierającego cykl prac A1-A6 wraz z objaśnieniami. Praca A1 została opublikowana w ramach konferencji „Physics of Magnetism 2017” odbywającej się w Poznaniu. Praca ta przedstawia wyniki obliczeń prądów spinowych i ich zależności od temperatury i koncentracji nośników ładunku dla gazu elektronów lub dziur przewodnictwa dla symetrii kubicznej oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby. Doktorantka posługuje się formalizmem funkcji Greena i pokazuje rozwiązanie analityczne problemu możliwe do oszacowania dla temperatury równej zeru a następnie rozwiązuje to zagadnienie numerycznie dla niezerowych temperatur. W podsumowaniu pracy A1 pada stwierdzenie, iż zaproponowany model jest podstawowy, ale może zostać użyty do opisu przewodności spinowej Halla dla tlenków perowskitów oraz nanostruktur półprzewodnikowych. Nie wypada mi recenzować pracy, która już recenzję przeszła, ale muszę zauważyć, iż praca A1 nie zawiera żadnego powiązania z danymi literaturowymi uzyskanymi teoretycznie bądź doświadczalnie (Doktorantka jedynie wspomina, że otrzymane w pracy A1 wyniki na rys. 1 są zgodne z referencją numer 38 z pracy A1). Dobrze, że Doktorantka zamieściła dyskusję pracy A1 na str. 62-64, w której odnosi się do obliczeń zestawionych w literaturze. Doktorantka pokazuje również bardzo ciekawe zależności kąta spinowego efektu Halla w funkcji koncentracji nośników dla różnych parametrów oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby. Niestety w tej części dysertacji też nie znalazłem próby syntezy otrzymanych wyników z danymi literaturowymi. Następnie Doktorantka przedstawia wyniki pokazujące modyfikację obliczeń spinowego przewodnictwa Halla w przypadku, gdy gaz dwuwymiarowy oddziałuje z zewnętrznym namagnesowaniem bądź polem magnetycznym. Niestety poza opisem zawartości rysunku 4.2, na którym pokazano zależności przewodnictwa spinowego efektu Halla od trzech parametrów, brak jest wniosków płynących chociażby z charakteru otrzymanych zależności. Mam nadzieję, że takie wnioski Doktorantka przedstawi w trakcie obrony dysertacji. Kolejnym elementem jest podsumowanie części dotyczącej pracy A1. Tutaj Doktorantka opisuje kilka istotnych faktów wynikających z obliczeń oraz wskazuje na kilka z prac z dziedziny, które podejmują podobne problemy.

Kolejna praca wchodząca w skład rozprawy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej dotyczy obliczeń anomalnego efektu Halla i Nernsta w gazie dwuwymiarowym. Doktorantka wykazała w pracy A2, że komponent anomalnego efektu Halla niepodlegający dyssypacji jest związany z krzywizną Berry’ego. Wskazuje to na fakt, iż formalizm Matsubary-Greena jest ekwiwalentny z podejściem wykorzystującym krzywiznę Berry’ego. Następnym istotnym elementem pracy A2 jest wykazanie, że anomalne przewodnictwo Halla wykazuje maksimum

w przypadku, gdy energia kubicznego oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby oraz energia namagnesowania są podobne. Doktorantka pokazuje również zmniejszanie anomalnego przewodnictwa Halla, gdy jeden z ww. rodzajów energii dominuje. Kolejnym istotnym wynikiem pracy A2 jest pokazanie, iż anomalne przewodnictwo Nernsta wykazuje zmianę znaku w pobliżu temperatury Curie, równoległe do rosnącego potencjału chemicznego oraz namagnesowania. Doktorantka wskazuje na zgodność otrzymanych w pracy A2 wyników z danymi literaturowymi dla wybranych perowskitów oraz półprzewodników półmagnetycznych grupy III-V. Istotne jest też wykazanie przez Doktorantkę, iż zarówno anomalny efekt Halla jak i Nernsta są zależne od topologii badanego kryształu. Uważam wyniki zebrane w pracy A2 za bardzo ciekawe i istotne dla rozwoju możliwości opisu teoretycznego oraz w konsekwencji interpretacji efektów transportowych przy użyciu formalizmu Matsubary-Greena.

Kolejnym etapem pracy mgr Anny Krzyżewskiej była próba opisu teoretycznego wybranych właściwości transportowych gazu dwuwymiarowego w przypadku anizotropowej postaci oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby. Doktorantka analizuje również anomalny efekt Nernsta i jego zmiany w funkcji temperatury, potencjału chemicznego a także siły oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby i magnetycznego oddziaływania wymiennego. Doktorantka operuje w reżimie niskiej koncentracji centrów rozpraszających, w którym obserwowany jest wewnętrzny wkład do anormalnego efektu Halla a przewodnictwo Halla dobrze opisuje formalizmu oparty o krzywiznę Berry'ego. Wyniki prac nad powyższymi dwoma zagadnieniami doktorantka zebrała w pracy A3. Można by domniemywać z pobieżnego porównania prac A2 i A3, że w zasadzie Doktorantka wykonała zbliżone zadania w obu przypadkach zmieniając jedynie formę macierzy opisującej oddziaływanie spinowo-orbitalne. Dodatkowo Doktorantka sama konkluduje, iż oba wyżej wymienione rodzaje symetrii macierzy opisującej oddziaływanie z spinowo-orbitalne dają jakościowo podobne wyniki. Jednakże takie podejście wymagało ponownego sformułowania właściwych postaci równań do rozwiązania. Należy podkreślić, że podjęte w pracy A3 rozważania są w literaturze opisywane sporadycznie a dużo więcej źródeł literaturowych jest zbieżnych z tymi przedstawianymi w pracy A2, gdzie wiele prac opisuje formę liniową macierzy opisującej oddziaływanie spinowo-orbitalne typu Rashby. Doktorantka pokazuje, iż w strukturach niskowymiarowych perowskitów i innych strukturach półprzewodnikowych symetria oddziaływania spinowo-orbitalnego, która została przyjęta w pracy A3 jest bardziej właściwa ze względu na znaczny wkład od stanów krawędziowych czy też powierzchniowych. Zatem prawidłowe uwzględnienie efektów topologicznych w modelowaniu transportu takich układów stanowią o istotności formalizmu opanowanego przez Doktorantkę w pracy A3 i są bardzo istotne w opisie transportu kwazi-balistycznego. Stanowi to też istotny wskaźnik pokazujący na ewolucję podejścia Doktorantki do obliczeń w pracy A1 przez A3, czego kulminacją jest praca A3.

Dzięki opracowaniu metod obliczeniowych umożliwiających badania właściwości transportowych gazu dwuwymiarowego w obecności oddziaływań wymiennych Doktorantka uzyskała narzędzia i umiejętności niezbędne, aby prowadzić badania w układach, w których występuje liniowe lub kubiczne (anizotropowe) oddziaływanie spinowo-orbitalne typu Dresselhausa. Aby to osiągnąć Doktorantka skonstruowała model analityczny modelujący strukturę studni kwantowej utworzonej z kryształu półprzewodnikowego o strukturze blendy cynkowej w kierunku (001), w którym obecne jest namagnesowanie oraz magnetyczne oddziaływanie wymienne. Model ten jest następnie implementowany przez mgr Annę Krzyżewską w pracy A4 do modelowania polaryzacji spinowej indukowanej przepływem ładunku w wyżej wymienionych strukturach. Obliczenia prądu polaryzacji spinowej jest możliwe dzięki zastosowaniu przez Doktorantkę wzoru Kubo w ramach formalizmu Matsubary-Greena. Ponadto przy pewnych założeniach Doktorantka przedstawia zależności analityczne umożliwiające w pewnych warunkach wykorzystanie ich do dopasowania wyników doświadczalnych. Oczywiście, podobnie do poprzednich prac A1 i A2 Doktorantka pokazuje również bardzo ciekawe powiązania fazy/krzywizny Berry'ego z właściwościami gazu dwuwymiarowego.

Doktorantka w pracy A4 wykazała, że kubiczna forma oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Dresselhausa pełni dominującą rolę w przypadku wysokich wartości potencjału chemicznego, który prowadzi do liniowej zależności polaryzacji spinowej od potencjału chemicznego. Ponadto wykazane jest istnienie oscylacji krzywizny Berry'ego w przypadku obecność kubicznego członu Dresselhausa oddziaływania spinowo-orbitalnego. Trzecim z dokonań pracy A4 jest pokazanie w oparciu o relacje Motta limitu termicznego wzbudzenia polaryzacji spinowej w studni kwantowej. Zgadzam się ze zdaniem Doktorantki z podsumowania pracy A4, że wyniki, które otrzymała będą bardzo wartościowe dla technologów oraz fizyków doświadczalnych. Szkoda tylko, że Doktorantka nie nawiązała takiej współpracy w trakcie swojej pracy. Tak jak wspomniałem, dodałoby to wartości tej pracy, już aktualnie wysokiej. Moje wątpliwości budzą wykresy polaryzowalności spinowej przedstawionej na rysunku 4.3 (str. 92). Dla temperatury równej zeru mamy tam wartości około 70 jako maksymalne. Nie rozumiem skąd wzięła się taka wartość i prosiłbym Doktorantkę o komentarz w tej kwestii podczas obrony. Jakiej wartości oczekujemy w temperaturze równej zeru? Jaka jest maksymalna wartość tej wielkości w jednostkach przyjętych przez Doktorantkę? To moja jedyna wątpliwość dotycząca tego rozdziału, nie jest ona krytyczna, być może wynika z moich braków wiedzy bądź zrozumienia. Tak czy inaczej uważam, że praca doktorska nie powinna prowadzić do takich wątpliwości.

Po opanowaniu metod obliczeniowych związanych z różnymi formami oddziaływania spinowo-orbitalnego Doktorantka podjęła problem wykorzystania pozyskanych umiejętności do modelowania zjawiska tzw. magnetooporu biliniowego. Wyniki tych badań zostały ujęte w pracy A5. Zjawiska modelowane przez Doktorantkę są ściśle związane z nierównowagą polaryzacją spinową indukowaną przez oddziaływanie spinowo-orbitalne i występują one



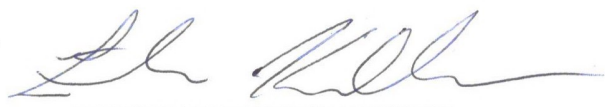
między innymi w układach warstw ferromagnetycznych osadzonych na metalach lub izolatorach topologicznych. Czasem zjawisko jednokierunkowego magnetooporu może również występować w strukturach niemagnetycznych i jest liniowo zależny od gęstości ładunku i zewnętrznego pola magnetycznego w szczególności, gdy powierzchnie Fermiego są silnie anizotropowe. Doktorantka pokazała w pracy A5, że biliniowy magnetoopór jest silnie związany z efektywnym polem spinowo-orbitalnym, którego konsekwencją jest występowanie nierównowagowej polaryzacji spinowej. Doktorantka wskazuje w pracy A5 jednoznaczne powiązanie swojej pracy z wynikami doświadczalnymi prezentowanymi w literaturze dla struktur perowskitów pokazując jednocześnie parametry struktury elektronowej i chemicznej, które są odpowiedzialne za to zjawisko. Widać wyraźnie w pracy A5, że Doktorantka coraz swobodniej operuje aparatem pojęciowym oraz interpretacyjnym, które opracowała i bardzo dobrze konstruuje wnioski.

Ostatnia praca wchodząca w skład rozprawy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej tj. praca A6 powraca nieco do wcześniejszych prac koncentrujących się na modelowaniu efektu Halla w przypadku kubicznej postaci oddziaływania spinowo-orbitalnego typu Rashby. Tym razem jednak Doktorantka podjęła temat modelowania nieliniowego efektu Halla, bardzo ciekawego zjawiska badanego w ostatnich latach i związanego z topologią układu i kontrolowanego przez pole magnetyczne indukowane w płaszczyźnie gazu dwuwymiarowego. Doktorantka pokazuje wyniki analityczne i numeryczne, które wskazują na fakt, iż pole magnetyczne w kierunku prostopadłym do płaszczyzny gazu dwuwymiarowego prowadzi do powstawania niezerowej krzywizny Berry'ego, zaś pole magnetyczne w płaszczyźnie gazu dwuwymiarowego zmienia krzywiznę Berry'ego i może prowadzić do powstawania dipoli krzywizny Berry'ego, czyli symetrycznych względem potencjału chemicznego maksimów krzywizny Berry'ego obserwowanych dla różnych podpasz energetycznych. Wyniki te zostają następnie użyte do oszacowania liniowego i nieliniowego wkładu do efektu Halla. Doktorantka następnie pokazała, iż w reżimie liniowym efektu Halla przewodnictwo jest zdominowane przez składową związaną z powstaniem krzywizn Berry'ego. Z kolei składowe nieliniowe są zdominowane przez stany z poziomu Fermiego. Wyniki zebrane w pracy A6 są kolejnym dowodem na to, że praca naukowa mgr Anny Krzyżewskiej jest istotna dla środowiska naukowego i pozwala w istotny sposób wzbogacić interpretację wyników transportowych w tych złożonych układach. Pokazuje też, iż fizyka efektów topologicznych mimo dwóch dekad rozwoju nadal kryje wiele problemów wymagających rozwiązania, co Doktorantka moim zdaniem czyni z sukcesem.

Podsumowując powyższe omówienie prac A1 do A6 muszę stwierdzić, iż Doktorantka wykonała ogrom pracy pozwalający jej rozwinąć techniki modelowania złożonych zjawisk związanych z topologią, oddziaływaniami spinowo-orbitalnym i wymiennym a także wpływu ww. zjawisk jak i parametrów zewnętrznych oraz wewnętrznych na właściwości transportowe gazu dwuwymiarowego w strukturach półprzewodnikowych. Uważam, iż praca ta stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny jest jak najbardziej aktualna w swej treści.

Po lekturze całej dysertacji mgr Anny Krzyżewskiej wypada mi również skomentować pozytywnie stronę edytorską i przygotowanie redakcyjne rozprawy. Mimo moich wcześniejszych uwag negatywnych dotyczących symboliki i akronimów pozytywnie oceniam układ pracy i jej język. Wychwyciłem podczas lektury niewielką ilość drobnych błędów edytorskich, językowych i interpunkcyjnych, co pozwala mi wyrazić pozytywną opinię na temat redakcji pracy przez mgr Annę Krzyżewską. Niestety przyjęty układ pracy w postaci tak zwanej „zszywki” powoduje, iż w wielu miejscach jej lektura jest trudna, chociażby ze względu na układ graficzny publikacji, powtarzające się wstępy i zakończenia czy też wielokrotne spisy literatury. Mimo powyższej krytyki praca doktorska mgr Anny Krzyżewskiej to porządne dzieło, które będzie stanowiło w przyszłości dobre źródło wiedzy dla studentów i naukowców. Nadal uważam, że klasyczny układ pracy doktorskiej, zwłaszcza w przypadku dość dużej ilości wyników, które prezentuje Doktorantka, lepiej odpowiadałby historii jej pracy i dokonań. Nie zmienia to jednak mojej ostatecznej pozytywnej opinii dotyczącej pracy doktorskiej mgr Anny Krzyżewskiej.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr. Anny Krzyżewskiej jest ściśle związana z aktualnie prowadzonymi badaniami na Świecie. Należy jednak podkreślić, iż większość wyników badań zebranych w rozprawie powinna być traktowana również, jako wartościowe wyniki mogące stanowić podstawę zastosowań oraz udoskonalień technologii wzrostu niskowymiarowych nanostruktur półprzewodnikowych. Doktorantka otrzymała szereg bardzo ciekawych, ważnych i nowych wyników naukowych stanowiących istotne elementy budujące wiedzę w dziedzinie fizyki ciała stałego. Podsumowując, moja całościowa i końcowa ocena recenzowanej rozprawy doktorskiej to ocena dobra. Wszystkie negatywne uwagi ogólne jak i szczegółowe mają głównie na celu zwrócenie uwagi Doktorantki na niedociągnięcia i niedoskonałości recenzowanej rozprawy, nie mają jednak wpływu na moją końcową pozytywną ocenę. **W związku z powyższymi jednoznacznie stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr. Anny Krzyżewskiej spełnia wymogi zwyczajowe i ustawowe stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązujące przepisy prawa, o których mowa w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku. Składam, zatem wniosek do Rady Naukowej Dyscyplin Nauki Fizyczne i Astronomia Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. Anny Krzyżewskiej do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania jej stopnia naukowego doktora nauk fizycznych.**



(dr hab. Łukasz Kilański)