

Ocena dorobku naukowego oraz recenzja osiągnięcia habilitacyjnego dr Krzysztofa Dybko pt.
„Wpływ spinu i oddziaływania spinowo-orbitalnego na własności transportowe silnie
skorelowanych złożonych tlenków oraz topologicznych izolatorów krystalicznych”

Dr Krzysztof Dybko ukończył studia magisterskie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w r. 1985, przy czym pracę magisterską pt. „Emisja Landau’owska w półprzewodnikach z wąską przerwą energetyczną” wykonał pod kierunkiem prof. dr hab. Mariana Grynberga (ko-promotorem był mgr Wojciech Knap). Zaraz po studiach dr Dybko podjął pracę w Instytucie Fizyki PAN, gdzie włączył się w badania półprzewodników półmagnetycznych, które w ówczesnym okresie stanowiły główną tematykę badawczą z zakresu fizyki półprzewodników w Instytucie Fizyki PAN; prace badawcze zespołu, w których uczestniczył dr Dybko, nagrodzone były dwukrotnie (1986 r. oraz 1988 r.) nagrodą Sekretarza Naukowego PAN. Z zakresu tej tematyki pochodzą też badania, które dr Dybko opisał w swojej rozprawie doktorskiej, obronionej w roku 1996, zatytułowanej „Własności transportu elektronowego w półprzewodnikach półmagnetycznych na bazie żelaza”. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. Andrzej Mycielski.

Ocena dorobku naukowego

Od czasu obrony doktoratu dr Dybko kontynuuje pracę w Instytucie Fizyki PAN, z przerwami, najpierw na 2-letni pobyt na stażu naukowym na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Leoben (Austria) w latach 1998-2000, a następnie na kilka kilkumiesięcznych zagranicznych staży naukowych, między innymi w laboratoriach silnych pól magnetycznych w Nijmegen (Holandia) i Grenoble (Francja). Dr Dybko specjalizuje się w doświadczalnej fizyce materii skondensowanej, zwłaszcza w zakresie badań transportu elektronowego w ciałach stałych; jego zainteresowania obejmują szereg różnych problemów, które mogą być analizowane metodą badań transportowych. W okresie stażu w Austrii zajmował się kwantowym przejściem fazowym plateau-plateau w kwantowym efekcie Halla w dwuwymiarowym gazie elektronowym w heterostrukturach GaAs/AlGaAs; był współautorem pracy na temat dynamicznego wykładnika krytycznego dla takich przejść, opublikowanej w Physical Review Letters w r. 2002, która to praca doczekała się 31 cytowań. Badania własności dwuwymiarowego gazu elektronowego kontynuował po powrocie do Polski, tym razem w heterostrukturach GaN/AlGaN, współpracując przez szereg lat z grupą z Instytutu Wysokich Ciśnień PAN. Najlepiej cytowana praca (54 cytowania) z tej dziedziny została opublikowana w 2005 r. w Applied Physics Letters. Zaangażował się też w prace na temat heterostruktur zawierających warstwy ferromagnetyczne, początkowo półprzewodnikowe, a następnie zbudowane z warstw manganitów i wysokotemperaturowego nadprzewodnika $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO). W tym ostatnim przypadku współpracował z grupą kierowaną przez prof. Przysławskiego; w wyniku powstało szereg wspólnych prac dotyczących współistnienia nadprzewodnictwa i ferromagnetyzmu w takich układach. Najciekawsza z tych prac, opublikowana w Physical Review B w 2009 r., cytowana dotychczas 38 razy, opisuje pomiary dynamicznego przewodnictwa takich struktur, które mogą wskazywać na powstawanie par Coopera typu trypletowego; pomiary transportowe, których głównym projektodawcą był dr Dybko, były najważniejsze dla wyciągnięcia tego wniosku.

Innym tematem, którym zajął się dr Dybko, były badania krystalicznych izolatorów topologicznych, wytworzonych na bazie związków IV-VI, których badania podjęto w IFPAN około dekadę temu. Jedną z pierwszych prac, w których opisano taki materiał, była publikacja z *Nature Materials* (2012 r.), w której dr Dybko był trzecim autorem. W tym przypadku był to mieszany związek $Pb_{1-x}Sn_xSe$, w którym w miarę zwiększania zawartości cyny x obserwuje się przejście od prostej do odwróconej kolejności pasm, co okazuje się być kluczowe dla powstania topologicznie chronionych stanów powierzchniowych; praca ta ma już 429 cytowań. Wreszcie, warto wspomnieć o jeszcze jednym kierunku zainteresowań dr Dybko, to jest o badaniach własności termoelektrycznych materiałów, które są ważne dla potencjalnych zastosowań. W ramach tych badań, rozpoczętych również około dekadę temu, dr Dybko zbudował układ do pomiarów skuteczności konwersji energii cieplnej w elektryczną. Najlepiej jak dotychczas cytowana z tej tematyki (13 cytowań) jest praca dotycząca wzrostu i własności termoelektrycznego materiału kompozytowego złożonego z antykropek CdTe zanurzonych w PbTe, opublikowana w 2011 r.

Całkowity dorobek naukowy dr Dybko jest bogaty – jest współautorem 90 prac, które ukazały się w ciągu 24 lat; w tym 73 prace po doktoracie (dane z Web of Science, dnia 7 grudnia 2019 r.). Nawet zważywszy na fakt, że 30 spośród tych prac są to prace konferencyjne opublikowane w *Acta Physica Polonica A*, to i tak jest to bardzo znaczący dorobek. Większość prac opublikowana jest w dobrych czasopismach, takich jak, np. *Physical Review Letters* (1 praca), *Nature Materials* (1 praca), *Physical Review B* (5 prac), *Applied Physics Letters* (2 prace), *Journal of Applied Physics* (2 prace), *EPL* (2 prace), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2 prace), i szereg innych. Dr Dybko wygłosił 4 referaty zaproszone na międzynarodowych konferencjach. Prace współautorstwa dr Dybko cytowane są 974 razy (926 bez autocytowań), współczynnik Hirscha wynosi 13. Wśród tych cytowań prawie połowa przypada na wspomnianą wyżej publikację z *Nature Materials* (2012 r.), pt. „Topological crystalline insulator states in $Pb_{1-x}Sn_xSe$ ”, co świadczy o bardzo dużym znaczeniu tego wyniku dla dziedziny badań nad izolatorami topologicznymi.

Trzeba w tym miejscu podkreślić, że wszystkie opisane powyżej prace powstawały w dużych zespołach badawczych, liczących od kilku do kilkunastu osób, i były wykonane w ramach realizacji ok. 15-tu różnych projektów badawczych. Dr Dybko kierował jednym projektem, realizowanym w latach 2013-2017, dotyczącym badań transportu powierzchniowego w krystalicznych izolatorach topologicznych. W pozostałych projektach dr Dybko był wykonawcą bądź głównym wykonawcą. Tym niemniej, nie ulega żadnej wątpliwości, że dr Dybko odgrywał rolę wiodącą we wszystkich badaniach transportowych realizowanych w tych projektach.

W ramach działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej habilitant prowadził ćwiczenia laboratoryjne na Wydziale Fizyki UW w r.1991 oraz ćwiczenia do wykładów ze wstępu do fizyki ciała stałego na Uniwersytecie kard. Stefana Wyszyńskiego w latach 2001-2002; kilka razy zastępował też wykładowcę w tych wykładach. Był promotorem jednej pracy licencjackiej i jednej magisterskiej; a od 2017 roku pełnił rolę promotora pomocniczego dla dwóch doktorantów w Instytucie Fizyki PAN. W latach 2015-17 był też opiekunem miesięcznych praktyk dla stypendystów Funduszu na Rzecz Dzieci, a począwszy od 2008 roku prowadził tygodniowe warsztaty dla młodzieży licealnej w ramach tego funduszu; od 2017 roku jest koordynatorem tych warsztatów z ramienia Instytutu Fizyki PAN. Dwukrotnie (2014 i 2015) prowadził też Dzień Otwarty w IFPAN, oraz stoisko na Festiwalu Nauki (2015). Uważam, że można uznać, że habilitant wykazał się umiejętnością pracy organizacyjnej, edukacyjnej i popularyzatorskiej.

Ocena osiągnięcia habilitacyjnego.

Osiągnięcie habilitacyjne dr Dybko składa się z pięciu wybranych z jego dorobku prac, opublikowanych w latach 2013-2018, które dotyczą dwóch dość różnych układów fizycznych, heterostruktur opartych o materiały silnie skorelowane (3 prace, H1-H3), oraz krystalicznych izolatorów topologicznych (2 prace, H4 i H5). Cechą wiążącą tematycznie problemy opisane w tych pracach jest fakt, że w obu tych przypadkach spin, bądź oddziaływanie spinowo-orbitalne mają istotny wpływ na szczególne własności transportowe występujące w tych układach. Wszystkie prace są wieloautorskie, ale dr Dybko jest pierwszym autorem w 4-rech z tych prac (z pominięciem kolejności alfabetycznej), zaś drugim autorem w jednej z nich. Duża ilość współautorów wynika z faktu, że badania opisane w pracach wymagały użycia bardzo różnych metod w celu dokładnej charakteryzacji materiałów. Według oceny samego habilitanta, która znajduje potwierdzenie w oświadczeniach współautorów, udział procentowy dr Dybko w wykonanie badań opisanych w tych pracach jest na poziomie 65-70% w trzech z tych prac, zaś jest nieco mniejszy, 40-50% w pozostałych. Co wydaje się ważniejsze to fakt, że dr Dybko w większości przypadków był pomysłodawcą badań transportowych opisanych w tych pracach, był w nich osobiście zaangażowany, a ich wyniki mają kluczowe znaczenie dla interpretacji prezentowanych badań. Do przedstawionych prac dołączony jest autoreferat, w którym autor pokrótce opisuje badania naukowe, w których brał udział od czasu obrony doktoratu, i na tym tle opisuje swój udział w pracach załączonych do oceny. To, czego moim zdaniem zabrakło w tym opisie, to podsumowania, na ile załączone prace mogły się przyczynić do rozwoju dziedziny, której dotyczą.

W pracach H1 oraz H2 badane były własności heterostruktur ferromagnetyk/nadprzewodnik wynikające z bliskiego sąsiedztwa dwóch różnych porządków dalekiego zasięgu, które w objętościowych materiałach zwykle się wykluczają. Tymczasem w przypadku heterostruktur zbudowanych z warstw o małej grubości porządki te mogą współistnieć w pewnych warunkach, a nawet mogą prowadzić do nowych, ciekawych zjawisk.

Jednym z takich zjawisk jest możliwość powstawania nadprzewodnictwa o symetrii typu p, czyli trypletowego. Teorie przewidują taką możliwość w przypadku niekolinearnego ustawienia momentów magnetycznych w warstwach ferromagnetycznych w pobliżu międzypowierzchni ferromagnetyk/nadprzewodnik. Pary Coopera o symetrii p mogą wnikać do warstwy ferromagnetycznej na duże odległości, co powoduje jednocześnie obniżenie temperatury krytycznej w warstwie nadprzewodzącej - doświadczenie potwierdziło obecność tego efektu w przypadku nadprzewodników konwencjonalnych. Poszukiwaniu właśnie tego zjawiska w nadprzewodniku wysokotemperaturowym YBCO poświęcona była praca H1, opublikowana w r. 2015 w Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Do wytworzenia niekolinearnego ustawienia spinów zastosowano strukturę tzw. zaworu spinowego, czyli układu złożonego z dwóch ferromagnetycznych warstw $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) o różnych grubościach, rozdzielonych warstwą izolującą. W pracy pokazano, że różna grubość warstw LSCO prowadzi do różnych pól koercji, co umożliwia powstawanie niekolinearnego ustawienia spinów. Kluczowym punktem doświadczenia był pomiar magnetooporu w nadprzewodzącej warstwie YBCO, osadzonej na opisanym wyżej zaworze spinowym, który pokazał anizotropię o dwukrotnej symetrii przy obracaniu pola magnetycznego w płaszczyźnie warstwy; jednocześnie, zaobserwowano niemonotoniczną zależność temperatury krytycznej, przypominającą przewidywania teoretyczne na temat powstawania stanu trypletowego. Wynik ten jest ciekawy, natomiast jego dyskusja jest zbyt skromna. Autorzy piszą, że wpływ na obserwowane zachowanie magnetooporu może mieć zarówno stan trypletowy, jak też dyssypacja związana z

ruchem wirów wywołanych składową prostopadłą pola magnetycznego. Wydaje mi się, że można było pokusić się o próbę oszacowania tego drugiego efektu, być może doświadczalną, co z pewnością zwiększyłoby wagę pracy. W obecnym kształcie praca uzyskała dotychczas ledwie 2 cytowania, choć sam wynik wydaje się zasługiwać na więcej.

W pracy H2, opublikowanej w *Journal of Physics–Condensed Matter* w 2013 r. (cytowanej 5 razy) przeprowadzono kompleksowe badania warunków koniecznych do zaistnienia ferromagnetyzmu i nadprzewodnictwa w supersieciach złożonych z ultracienkich warstw LSCO i YBCO, z ilością powtórzeń równą 20. Grubość warstwy YBCO była ustalona na dwie monowarstwy, co okazało się minimalną grubością, przy której występuje nadprzewodnictwo; zaś grubość LSCO była zmieniana od jednej do 4-ech stałych sieci. Badania transportowe pokazały, że nadprzewodnictwo znika przy grubościach LSCO większych od dwóch monowarstw; natomiast z analizy pomiarów namagnesowania i rezonansu ferromagnetycznego wynika, że spontaniczny porządek ferromagnetyczny pojawia się przy grubości LSCO równej 4 monowarstwy, zaś moment magnetyczny jest istotnie obniżony w stosunku do obserwowanego w objętościowym LSCO, co wskazuje na ważną rolę transferu ładunku z warstw YBCO do warstw LSMO.

W pracy H3, opublikowanej w *Journal of Physics D–Applied Physics* w 2018 r. (cytowanej 1 raz) badany był układ zaworu spinowego z dwiema ferromagnetycznymi warstwami LSCO o różnych grubościach przedzielonymi warstwą tlenku SrIrO_3 (SIO) o grubości od jednej do 6-ciu monowarstw. Tlenek SIO w postaci objętościowej jest paramagnetycznym półmetalem, z dużym oddziaływaniem spinowo-orbitalnym na skutek obecności ciężkiego pierwiastka irydu. W pracy, na podstawie pomiarów namagnesowania pokazano, że istnieje sprzężenie magnetyczne warstw LSCO poprzez warstwę SIO, przypuszczalnie na skutek oddziaływania typu RKKY. Na podstawie pomiarów rezonansu ferromagnetycznego pokazano, że momenty magnetyczne w dwóch warstwach LSCO są wzajemnie odwrócone o 90 stopni, być może na skutek oddziaływania Dzialoshynskiego-Moriya, które może się pojawiać w obecności silnego sprzężenia spinowo-orbitalnego w SIO. Z kolei, badania magnetotransportowe pokazały, że układ ten, zależnie od kierunku zewnętrznego pola magnetycznego w stosunku do płaszczyzny warstwy i kierunku prądu, ma własności zaworu spinowego lub odwrotnego zaworu spinowego, czyli wykazuje maksimum lub minimum oporu przy reorientacji momentów magnetycznych w warstwach LSCO.

Prace H4 i H5 dotyczą badań krystalicznych izolatorów topologicznych. W pracy H4 (*New Journal of Physics*, 2016 r.) zbadano doświadczalnie i teoretycznie termomagnetyczny efekt Nernsta-Ettingshausena (NE) w mieszanym związku $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$, w którym zwiększanie zawartości cyny, x , prowadzi do odwrócenia pasm i powstania topologicznie chronionych stanów powierzchniowych, przy czym zależnie od x efekt pojawia się w różnych temperaturach. W pracy badano doświadczalnie prostopadłe zjawisko NE, w którym w wyniku obecności gradientu temperatury w próbce, ΔT , i obecności pola magnetycznego prostopadłego do ΔT , powstaje pole elektryczne prostopadłe do gradientu i pola. W literaturze przedmiotu sugerowano, że zjawisko NE zmienia znak w temperaturze, w której następuje odwrócenie pasm, ale były to wyniki otrzymane doświadczalnie jedynie dla jednego składu x . Tymczasem pomiary oraz obliczenia przedstawione w pracy H4 dla szeregu próbek o różnym x pokazują, że nie ma zmiany znaku, lecz pojawia się w tej temperaturze maksimum współczynnika NE, co może mieć znaczenia dla identyfikacji stanów topologicznych. Warto tu podkreślić, że dr Dybko zajmował się w tych badaniach nie tylko pomiarami magnetotranspotu, ale brał także udział w pracach nad algorytmem obliczeniowym użytym w modelu teoretycznym. Nieco zaskakujące jest, że praca ta,

opublikowana w 2016 r. nie ma dotychczas cytowań, ale wydaje się, że pojawiają się one z czasem, ponieważ wyniki tej pracy mogą mieć zastosowanie do opisu transportu w wielu materiałach z małą lub zerową przerwą energetyczną.

W pracy H5, opublikowanej w Physical Review B w r. 2017 i cytowanej dotychczas 7 razy, podjęto się weryfikacji teoretycznego przewidywania, że w krystalicznych izolatorach topologicznych 2-wymiarowe stany powierzchniowe, chronione topologicznie, powstają na wszystkich powierzchniach objętościowego kryształu. W pracy badany był niskotemperaturowy magnetotransport kwantowy i magnetyzacja dla kryształów SnTe z odwróconą strukturą pasmową i dużą koncentracją nośników (dziur). Zmierzono oscylacje Shubnikowa-de Haasa i kwantowy efekt Halla, a także oscylacje de Haasa-van Alphen. Na podstawie tych pomiarów odseparowano efekty pochodzące od stanów objętościowych i powierzchniowych oraz wyznaczono fazę Berry'ego równą π , potwierdzając tym samym, że obserwowane stany powierzchniowe są fermionami Diraca. Pokazano także, że przy zmianie kąta między kierunkiem pola magnetycznego i kierunkami osi krystalicznych otrzymuje się oscylacje pochodzące od różnych powierzchni kryształu, co potwierdza istnienie topologicznie chronionych 2-wymiarowych stanów na różnych powierzchniach. Wykonano też teoretyczne obliczenia magnetyzacji, uwzględniając efekt przypinania poziomu Fermiego przez rezerwuuar nośników objętościowych. W pracy tej dr Dybko był niewątpliwym liderem, zaprojektował wszystkie doświadczenia, wykonał badania magnetotransportu i analizę doświadczeń, a także obliczenia numeryczne magnetyzacji oparte o model rezerwuaru nośników. Praca została nagrodzona przez Dyrektora IFPAN jako najlepsza publikacja roku 2017.

Podsumowując przedstawione do recenzji prace, uważam, że stanowią one znaczący wkład w badania wpływu zjawisk spinowych na własności transportowe badanych układów. Jednocześnie jednak muszę zwrócić uwagę na fakt, że cytowania tych prac (poza ostatnią) nie są zbyt duże, co oznacza, że duża część prezentowanych wyników pozostaje niedoceniona przez środowisko naukowe. Jest to istotny kontrast w stosunku do niektórych innych publikacji współautorstwa dr Dybko wspomnianych w pierwszej części tej recenzji, cytowanych częściej, a niewłączonych do ocenianego cyklu prac. Spośród pięciu recenzowanych prac moim zdaniem najciekawsze są dwie ostatnie, dotyczące krystalicznych izolatorów topologicznych. Wynika to nie tylko z bardzo zaawansowanej techniki pomiarów magnetotransportowych, ale również z dobrze przeprowadzonej analizy teoretycznej i szerokiej dyskusji, w której dr Dybko miał istotny udział. Pod tym względem, trzy pierwsze prace, dotyczące heterostruktur, pozostawiają pewien niedosyt.

Wniosek końcowy

Mimo pewnych uwag krytycznych, biorąc pod uwagę przedstawione osiągnięcia habilitacyjne oraz całokształt dorobku naukowego dr Dybko uważam, że dr Dybko jest samodzielnym, dojrzałym badaczem. Dotychczasowe osiągnięcia kwalifikują go w pełni do stopnia naukowego doktora habilitowanego.



Prof. dr hab. Marta Cieplak