



Prof. dr hab. Józef Barnaś
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu

RECENZJA

osiągnięcia habilitacyjnego dra Jarosława Pawłowskiego
oraz ocena Jego dorobku naukowego

Informacje ogólne o dorobku naukowym Habilitanta

Dr Jarosław Pawłowski ukończył studia w roku 2009 na Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH) w Krakowie. Stopień naukowy doktora nauk fizycznych uzyskał w roku 2014 na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w oparciu o rozprawę „Operacje na spinie pojedynczego elektronu w kropce kwantowej bez użycia pola magnetycznego”, przygotowaną pod opieką prof. dr. hab. Stanisława Bednarka. W tym samym roku zatrudniony został na AGH na etacie asystenta. W roku 2016, w ramach grantu NCN „Fuga”, wyjechał do Wrocławia celem odbycia stażu podoktorskiego na Politechnice Wrocławskiej. Po ukończeniu stażu został zatrudniony jako adiunkt w Instytucie Fizyki Teoretycznej na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

Począwszy od pracy doktorskiej, tematyka jego badań naukowych koncentruje się głównie wokół fizyki kropek kwantowych, w tym kropek na bazie dwuwymiarowych materiałów van der Waalsa. W ramach tej tematyki Habilitant przygotował swój wniosek habilitacyjny. Według danych zawartych w autoreferacie Habilitanta, Jego całkowity dorobek publikacyjny

obejmuje 34 publikacje, w tym 3 przed doktoratem i 31 po doktoracie. Obejmuje to również prace stanowiące osiągnięcie habilitacyjne. W jednej publikacji jest jedynym autorem a w pozostałych jest jednym z współautorów. W 14-stu publikacjach jest jednak pierwszym autorem. Należy podkreślić, że publikacje te ukazały się w czasopismach o wysokim prestiżu naukowym. Dorobek naukowy dr Jarosława Pawłowskiego obejmuje również prezentacje na wielu konferencjach krajowych i zagranicznych. Swoje badania naukowe prowadził w ramach projektów NCN, których był kierownikiem (Sonata i Fuga), oraz kilku projektów, w których pełnił rolę wykonawcy.

Jeśli chodzi o parametry bibliometryczne, to podam je dla formalności, gdyż pełnią one jedynie rolę pomocniczą. Ocenie podlega natomiast realny wkład do poszczególnych publikacji tworzących osiągnięcie habilitacyjne, a tym samym wkład do odpowiedniej dyscypliny naukowej. Z danych zawartych we wniosku wynika, że liczba cytowań prac, których Habilitant jest autorem/współautorem, w chwili składania wniosku wynosiła 247 (198 bez autocytowań) według bazy Web of Science, natomiast odpowiedni indeks Hirscha wynosił 10.

Opinia nt. osiągnięcia naukowego będącego podstawą wniosku habilitacyjnego

Osiągnięcie habilitacyjne stanowi cykl siedmiu publikacji poświęconych badaniom spinowego i dolinowego stopnia swobody w układach zero-wymiarowych (kropkach kwantowych) i jedno-wymiarowych (kwantowych kanałach) na bazie struktur van der Waalsa. Cykl ten obejmuje następujące publikacje:

- [1] J. Pawłowski, D. Żebrowski, and S. Bednarek, *Valley qubit in a gated MoS₂ monolayer quantum dot*, Phys. Rev. B **97**, 155412 (2018).
- [2] J. Pawłowski, *Spin-valley system in a gated MoS₂-monolayer quantum dot*, New Journal of Physics **21**, 123029 (2019).
- [3] J. Pawłowski, M. Bieniek, and T. Woźniak, *Valley two-qubit system in a MoS₂-monolayer gated double quantum dot*, Phys. Rev. Appl. **15**, 054025 (2021).
- [4] A. Altıntaş, M. Bieniek, A. Dusko, M. Korkusiński, J. Pawłowski, and P. Hawrylak, *Spin-valley qubits in gated quantum dots in a single layer of transition metal dichalcogenides*, Phys. Rev. B **104**, 195412 (2021).
- [5] J. Boddison-Chouinard, A. Bogan, P. Barrios, J. Lapointe, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Pawłowski, D. Miravet, M. Bieniek, P. Hawrylak, A. Luican-Mayer, and L. Gaudreau, *Anomalous conductance quantization of a one-dimensional channel in monolayer WSe₂*, npj 2D Materials and Applications **7**, 50 (2023).
- [6] J. Pawłowski, J. E. Tiessen, R. Dax, and J. Shi, *Electrical manipulation of valley qubit and valley geometric phase in lateral monolayer heterostructures*, Phys. Rev. B **109**, 045411 (2024).
- [7] J. Pawłowski, D. Miravet, M. Bieniek, M. Korkusinski, J. Boddison-Chouinard, L. Gaudreau, A. Luican-Mayer, and P. Hawrylak, *Interacting holes in a gated WSe₂ quantum channel: valley correlations and zigzag Wigner crystal*, Phys. Rev. B **110**, 125147 (2024).

Wszystkie wyżej wymienione publikacje tworzące osiągnięcie habilitacyjne dotyczą dwuwymiarowych materiałów van der Waalsa (vdW), w szczególności grupy tych materiałów znanych jako dichalkogenki metali przejściowych. Materiały te są ostatnio przedmiotem intensywnych badań. Ich struktura elektronowa jest już stosunkowo dobrze znana. Najważniejszą cechą tej struktury są minima pasma przewodnictwa (doliny) i maksima pasma walencyjnego w punktach Diraka K i K' strefy Brillouina. Punkty K i K' są jednak nierównoważne. Oprócz spinowego stopnia swobody, elektronom w takich materiałach można dodatkowo przypisać tzw. dolinowy stopień swobody.

Chociaż wszystkie publikacje tworzące osiągnięcie habilitacyjne dotyczą materiałów van der Waalsa, to jednak można je podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa obejmuje prace [1-4] oraz [6] i dotyczy kubitów dolinowych (jak również spinowych i dolinowo-spinowych) w kropce kwantowej na bazie struktur vdW, w szczególności MoS₂. Natomiast druga grupa (publikacje [5] i [7]) dotyczy transportu w jednowymiarowych kanałach WSe₂ i w jednym przypadku obejmuje również wyniki eksperymentalne.

Oprócz publikacji [2], wszystkie pozostałe są pracami wieloautorskimi. Średnia liczba autorów z wszystkich publikacji jest powyżej 5, co w przypadku prac teoretycznych wydaje się dość dużo. W pięciu pracach Habilitant jest pierwszym autorem, natomiast w pozostałych dwóch jest na odległych, tj. na piątej i siódmej pozycji odpowiednio w pracach [4] i [5]. To z kolei oznacza, że tak jak w przypadku wyżej wspomnianych pięciu publikacji wkład Habilitanta w ich powstanie jest dominujący, tak w przypadku pozostałych dwóch publikacji wkład ten jest pomocniczy. Pokrywa się to również z oświadczeniami współautorów. Przejdę teraz do krótkiego podsumowania i analizy wyników uzyskanych w poszczególnych publikacjach tworzących osiągnięcie habilitacyjne.

Publikacja [1] poświęcona jest zdefiniowaniu i konstrukcji dolinowego kubit w kropce kwantowej na bazie dwuwymiarowego materiału MoS₂, należącego do grupy dichalkogenków metali przejściowych. Jak już wspomniałem wyżej, elektrony w takich materiałach mają dwa stopnie swobody: dolinowy oraz spinowy. W pracy [1] jest opisana metoda jak przy pomocy układu bramek i odpowiednich potencjałów na bramkach można ograniczyć pewien obszar dwuwymiarowego układu i zamknąć w nim określoną liczbę elektronów. Jest to metoda dobrze znana i stosowana do konstrukcji kropek kwantowych na bazie dwuwymiarowego gazu elektronowego w konwencjonalnych strukturach półprzewodnikowych. W zależności od potencjałów na bramkach, elektrony (dziury) zlokalizowane w kropce mogą znajdować się w dolinach pasma przewodnictwa (wierzchołkach pasma walencyjnego). Z rozwiązania równania Schrödingera, przy wykorzystaniu uogólnionego równania Poissona dla potencjału elektrostatycznego oraz uwzględnieniu oddziaływania spin-orbita, w publikacji wyznaczone zostały stany elektronowe dla kropki kwantowej z jednym elektronem uwięzionym w kropce kwantowej w paśmie przewodnictwa. Wyznaczone niskoenergetyczne stany leżące w przerwie energetycznej, to stany $K'\uparrow$ i $K\downarrow$ o niższej energii i stany $K'\downarrow$ i $K\uparrow$ o wyższej energii. Kubit dolinowy tworzy para stanów $K'\uparrow$ i $K\uparrow$ (lub $K\downarrow$ i $K'\downarrow$). Zdefiniowano również kubit hybrydowy, tj. spinowo-dolinowy, na bazie stanów $K'\uparrow$ i $K\downarrow$ (lub $K'\downarrow$ i $K\uparrow$). W tym

przypadku oba stany kubitów są zdegenerowane, ale można je rozszczepić polem magnetycznym.

Z praktycznego punktu widzenia, kluczowym problemem jest możliwość wykonania operacji logicznych na kubicie. W pracy zaproponowano wykorzystanie odpowiednich bramek (sprzęgających ze sobą obie doliny) do zaprezentowania operacji logicznych, np. typu NOT. Rozważono kubit dolinowy utworzony ze stanów $K'\uparrow$ i $K\uparrow$, zakładając stan początkowy z elektronem w dolinie K. Ewolucję czasową kubitów przeprowadzono zakładając dodatkowy człon oscylacyjny w odpowiednich napięciach bramkujących. Rozwiązując zależne od czasu równanie Schrödingera pokazano, że przejścia kwantowe między dolinami K i K' mają charakter oscylacji Rabbiego. Pokazano, że po pewnym czasie (rzędu 50ns w rezonansie dla wybranych parametrów) zachodzi przejście z doliny K do K', co potwierdza funkcjonowanie bramki NOT. Oczywiście, spin elektronu nie ulega w tym czasie zmianie.

Publikację tą uważam za jedną z najważniejszych, a być może najważniejszą, z całego cyklu prac tworzących osiągnięcie habilitacyjne, głównie dlatego, że zawiera ona podstawowe założenia dotyczące kubitów dolinowych na bazie materiałów vdW i jego wykorzystania w informatyce kwantowej. Oczywiście koncepcja dolinowego kubitów nie jest nową, gdyż pojawiła się ona już w kontekście niektórych materiałów półprzewodnikowych z odpowiednią strukturą elektronową. W pracy tej widać duży wpływ prof. Bednarka i jego doświadczenia. Wkład Habilitanta do tej publikacji, zgodnie oświadczeniami współautorów był dominujący, w szczególności wspólnie z jednym z współautorów (SB) zaprojektował koncepcję pracy a z drugim (DŻ) przygotował wstępną wersję algorytmów. Habilitant rozwinął algorytmy i wykonał wszystkie obliczenia numeryczne, łącznie z grafiką.

Publikacja [2] jest indywidualną pracą Habilitanta i w zasadzie kontynuacją publikacji [1], gdyż wykorzystuje idee oraz analityczne i numeryczne metody w niej opisane. Z tą różnicą, że dołączone jest oddziaływanie spinowo-orbitalne typu Rashby kontrolowane polem elektrycznym prostopadłym do płaszczyzny, oraz zewnętrzne pole magnetyczne również prostopadłe do płaszczyzny układu. To pozwala kontrolować oddzielnie wszystkie sześć możliwych przejść w przestrzeni spin-dolina ($K'\uparrow$, $K\uparrow$, $K'\downarrow$, $K\downarrow$). W pracy tej Autor rozpatruje układ dwóch spinowo-dolinowych kubitów w kropce z jednym uwięzionym elektronem. Potencjał wiążący elektronu oraz pole elektryczne wyznaczone zostały z wykorzystaniem równania Poissona, natomiast postać oddziaływania Rashby otrzymano w ramach modelu ciasnego wiązania. To pozwoliło wyznaczyć sprzężenie między-dolinowe oraz parametr Rashby. Rozwiązując numerycznie czasowo-zależne równanie Schrödingera z dynamicznymi lokalnymi potencjałami bramek, Autor wyznaczył czasową ewolucję przejść kwantowych poprzez wyliczenie chwilowych wartości spinu i indeksu doliny, a wyniki zinterpretował w terminach jedno-kubitowych i dwu-kubitowych bramek logicznych.

Publikacja [3] jest kolejną pracą stanowiącą dalsze rozszerzenie tematyki zaproponowanej w pracy [1]. W pracy tej rozważony został układ dwóch elektronów zlokalizowanych w układzie podwójnej kropki kwantowej. W obliczeniach struktury elektronowej uwzględniono dodatkowo oddziaływanie kulombowskie między obydwoma elektronami. Ponadto uwzględnione zostało również zewnętrzne pole magnetyczne. Na bazie tej struktury

zdefiniowano układ dwóch kubitów dolinowych, zlokalizowanych po jednym w każdej kropce. Przez zastosowanie odpowiedniego układu planarnych bramek i przyłożonych napięć elektrycznych, w układzie można wykonywać logiczne operacje na pojedynczym kubicie, lub też na obydwu sprzężonych kubitach. Ewolucję czasową kubitów przy zmiennych potencjałach bramkujących wyznaczono podobnie jak w pracach [1] i [2], rozwiązując numerycznie czasowo-zależne równanie Schrödingera z uwzględnieniem równania Poissona. W pracy pokazano, że przy odpowiednich napięciach bramkujących (wyłączających oddziaływanie między kubitami na różnych kropkach) można wykonywać operacje na indywidualnym kubicie, natomiast operacje na dwóch kubitach można wykonywać włączając oddziaływanie między kubitami.

Tematyka pracy [4] jest kontynuacją idei zawartych we wcześniejszych publikacjach, jednakże dla układu o nieco innej geometrii. Monowarstwa MoS₂ znajduje się między dwoma warstwami grafitu, od których oddzielona jest dwoma izolującymi warstwami hBN. Oprócz bramek lateralnych wyznaczających kropkę kwantową, jest jeszcze bramka wertykalna w postaci ostrza STM, która generuje pole mieszające doliny. Poza tym, napięcie między warstwami grafitu daje dodatkowe pole prostopadłe. Strukturę elektronową policzono korzystając z metody stosowanej we wcześniejszych pracach, zmodyfikowanej nieco i dostosowanej do aktualnego układu. W kropce kwantowej ograniczonej potencjałem bramek zidentyfikowane zostały dwa spinowo-dolinowe kubity, omówione również w pracach [1] i [2]. W pracy tej zaproponowano operacje logiczne na pojedynczych kubitach spinowo-dolinowych (związane z rotacją spinu i jednoczesną zmianą doliny). Wymaga to przyłożenia odpowiedniego prostopadłego zewnętrznego pola elektrycznego i silnie zlokalizowanej bramki odpowiedzialnej za oddziaływanie między-dolinowe (pochodzące od ostrza STM). Wkład Habilitanta do tej publikacji był jednak niewielki i wg. oświadczeń sprowadził się do udziału w zaadaptowaniu modelu ciasnego wiązania do aktualnego układu.

W pracy [6] zastosowano dość unikalne podejście do problemu manipulacji kubitami. Rozważony został hybrydowy układ, będący planarnym złączem monowarstw MoS₂ i WS₂ wzdłuż krawędzi typu 'armchair'. Przy pomocy bramek planarnych wydzielono obszar kropki kwantowej, obejmujący również krawędź między MoS₂ i WS₂. Na krawędzi indukuje się ładunek elektryczny, którego potencjał prowadzi do mieszania stanów dolinowych, potrzebnego w operacjach logicznych na kubitach. Stosując metody wprowadzone w pracach omówionych wyżej, rozważono zarówno spinowo-dolinowy układ dwukubitowy jak i układ dwóch kubitów dolinowych. Ciekawą koncepcją jest wprowadzenie dolinowej fazy geometrycznej do opisu procesów manipulacji kubitami. Wkład Habilitanta do tej pracy był dominujący, jak wynika z oświadczeń.

Publikacje [5] i [7] nieco odbiegają tematycznie od pozostałych, wyżej omówionych prac. Wprawdzie dotyczą tej samej klasy materiałów, ale fizyczny problem w nich badany jest inny. Obydwie dotyczą transportu elektronowego w jednowymiarowym kanale WSe₂, otrzymanym z materiału dwuwymiarowego poprzez zastosowanie odpowiednich bramek. Pierwsza z tych publikacji ma charakter eksperymentalno-teoretyczny. Wyniki eksperymentalne dotyczące konduktancji w funkcji napięcia bramkującego pokazują istnienie pewnych zakresów napięć bramkujących, gdzie konduktancja osiąga wartość e^2/h lub $2e^2/h$.

Wkład Habilitanta sprowadzał się do udziału w sformułowaniu modelu ciasnego wiązania i wykonania obliczeń numerycznych wyjaśniających eksperymentalne wyniki. Druga z tych publikacji jest pracą teoretyczną i dotyczy problemu oddziaływania dziur w paśmie walencyjnych. Pokazano, że dla silnego oddziaływania stan podstawowy jest dolinowo-spolaryzowany. Natomiast dla mniejszych koncentracji dziur wskazano na możliwość pojawienia się fazy krystalicznej Wignera. Niewątpliwie, wkład Habilitanta do tej publikacji był większy od indywidualnych wkładów pozostałych współautorów.

Integralną częścią wniosku habilitacyjnego jest autoreferat Habilitanta. I tutaj mam pewne uwagi. Próbowałem doszukać się spisu wszystkich publikacji. W autoreferacie takiego spisu nie znalazłem. Znalazłem natomiast w pliku 'Wykaz osiągnięć', ale w tym wykazie nie ma tytułów prac, więc trzeba szukać w czasopismach lub jakiejś bazie aby się zorientować jakiego problemu dana publikacja dotyczy. Oczywiście, nie dotyczy to publikacji tworzących osiągnięcie habilitacyjne, gdyż spis tych prac jest wraz z tytułami. W autoreferacie znajdują się na przykład tytuły posterów prezentowanych na konferencjach. W tym kontekście, wydaje mi się, że pełny spis publikacji wraz z tytułami powinien być tam również zamieszczony.

Podsumowując stwierdzam, że tematyka prac tworzących osiągnięcie habilitacyjne jest bardzo aktualna w kontekście materiałów van der Waalsa. Również problem dolinowo-spinowych kubitów w kropkach kwantowych i ich wykorzystania w informatyce kwantowej jest aktualny, chociaż nie jest w pełni oryginalny gdyż był już badany w półprzewodnikowych materiałach (innych niż materiały vdW) z dolinową strukturą elektronową. Tym niemniej, bardzo pozytywnie oceniam podejście oparte na realistycznej strukturze elektronowej kropek kwantowych, wyznaczonej z uwzględnieniem wpływu otoczenia, w szczególności lokalnych bramek, oraz na realistycznej dynamice kubitów w czasowo zależnych bramkujących potencjałach.

Trochę brakuje mi głębszej dyskusji dotyczącej roli różnego typu defektów strukturalnych bramek, kropek kwantowych oraz samych materiałów van der Waalsa, jak również roli defektów spinowo-orbitalnych.

Opinia nt. aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej

Po ukończeniu studiów, Habilitant został zatrudniony na AGH (czyli w macierzystej uczelni) na stanowisku asystenta. Po dwóch latach uzyskał grant NCN „Fuga” na odbycie krajowego stażu. Po ukończeniu stażu na Politechnice Wrocławskiej już nie wrócił na AGH, tylko zatrudnił się jako adiunkt w Instytucie Fizyki Teoretycznej Politechniki Wrocławskiej. Z literalnego punktu widzenia można przyjąć, że warunek aktywności naukowej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej został spełniony.

Habilitant odbył też krótkie wizyty w zagranicznych placówkach naukowych. I tak, w roku 2023 spędził jeden tydzień na Uniwersytecie w Wurzburgu w grupie prof. Ronny Thomale,

natomiast w październiku 2023 przebywał z dwutygodniową wizytą na uniwersytecie w Regensburgu (w grupie prof. Mileny Grifoni oraz prof. Jaroslava Fabiana). Słabym punktem wniosku jest jednak brak dłuższego stażu naukowego za granicą. W podsumowaniu stwierdzam, że według mojej oceny Kandydat spełnia przesłankę ustawy dotyczącą aktywności w więcej niż w jednej uczelni lub placówce naukowej.

Wniosek końcowy

Przedstawiona wyżej opinia dotycząca osiągnięcia naukowego będącego podstawą wniosku habilitacyjnego dra Jarosława Pawłowskiego, oraz opinia nt. Jego działalności w innych instytucjach badawczych oraz nt. pozostałego dorobku naukowego pozwala stwierdzić, że osiągnięcia te spełniają w wystarczającym stopniu wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego dra habilitowanego w ramach ustawy z 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. W szczególności wniosek dra Jarosława Pawłowskiego o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego spełnia wymagania wynikające z art. 219 ust.1 pkt. 2 i 3 tej ustawy.

Poznań, 3 kwietnia 2025r.

Prof. dr hab. Józef Barnaś

