

Prof. dr hab. Włodzimierz Jaskólski
Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

**Opinia na temat osiągnięć naukowych
w postępowaniu habilitacyjnym dr. Michała Ingłota**

Wstęp: Analiza danych naukometrycznych kandydata.

Na dorobek naukowy dr. Michała Ingłota składa się 30 artykułów naukowych opublikowanych w dobrych i bardzo dobrych czasopismach naukowych, wśród których są *Physical Review Letters* (1), *Physical Review B* (12), *Applied Physics Letters*, czy *Opto-Electronics Review* oraz rozdział w książce *Electronic and Optical Materials* wydanej przez Woodhead Publishing Series w 2015 r. 23 z tych prac zostało opublikowanych po uzyskaniu w 2012 r. stopnia doktora. Wszystkie prace habilitanta są współautorskie, zostały zacytowane 236 razy (wg Scopus); jego indeks Hirsha wynosi 8 (wg Scopus i WoS). Jako osiągnięcie naukowe zatytułowane *Własności optyczne i transportowe wybranych struktur grafenowych* dr Michał Ingłot przedstawił cykl ośmiu publikacji, które ukazały się w latach 2014-2024. Wszystkie zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach, siedem w *Phys Rev. B* i jedna w *App. Phys. Lett.* Doczekały się one łącznie 86 cytowań, co daje 10 cytowań na publikację. We wszystkich dr Ingłot jest pierwszym autorem, a z oświadczeń współautorów wynika, że jego wkład w powstanie tych prac był dominujący. Opublikowanie osiągnięcia w bardzo dobrych czasopismach przy współautorstwie takich naukowców jak profesorowie Józef Barnaś i Vitalij Dugaev jest już pewną gwarancją wysokiej jakości przeprowadzonych badań oraz ich znaczenia.

Dr Michał Ingłot kierował projektem Preludium NCN (podczas realizacji doktoratu) oraz projektem finansowanym w 2021 r. przez Podkarpackie Centrum Innowacji (PCI); był wykonawcą w czterech innych projektach NCN, dwóch projektach PCI i w dwóch projektach ministerialnych. Odbił też dwa staże jedno-miesięczne oraz jeden cztero-miesięczny w Uniwersytecie Marcina Lutra w Halle w Niemczech, a także półroczny staż na Wydziale Fizyki UAM w Poznaniu. Wyniki swoich badań prezentował na niemal trzydziestu konferencjach głównie w formie plakatów (wygłosił jeden referat na konferencji w 2009 r. w Myczkowcach oraz dwa referaty na Międzynarodowej konferencji „Bezpieczeństwo energetyczno-ekologiczne surowców rozproszonych” w Stalowej Woli). Udzielał się w organizacji konferencji, kilkanaście razy recenzował artykuły do międzynarodowych czasopism naukowych, posiada bogate doświadczenie we współpracy z otoczeniem społecznym i gospodarczym.

Ponieważ ustawową rolą recenzenta jest jedynie ocena czy osiągnięcia naukowe kandydata stanowią znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej, przytoczone powyżej fakty mają na celu ukazanie pełniejszej sylwetki kandydata, lecz nie mają wpływu na ocenę przedstawionego osiągnięcia naukowego.

Ocena osiągnięcia naukowego zgłoszonego we wniosku.

Publikacja H1 to najwcześniejsza praca w cyklu i moim zdaniem jedna z ciekawszych. Otwiera ona serię publikacji (H1, H3, H5 i H6) poświęconych oddziaływaniu światła z grafenem. Pracując w jednodolinowym modelu Weyla-Diraca autorzy pokazali, że za pomocą światła można generować w grafenie polaryzację spinową. Generacja taka jest możliwa przy uwzględnieniu oddziaływania spin-orbita typu Rashby, czyli dla grafenu na podłożu, oraz w obecności pola magnetycznego równoległego do płaszczyzny grafenu, a jej mechanizmem są spinowo-zależne przejścia międzypasmowe. Zostało też wykazane, że proces ten zachodzi głównie dla częstotliwości fali elektromagnetycznej rzędu rozszczepienia spin-orbitalnego, a jego wydajność jest wysoka i sięga nawet 0.2 na foton.

W kolejnej publikacji H3 autorzy pokazali, że w podobnych warunkach można indukować światłem nie tylko polaryzację spinową, ale także prądy ładunkowe, a w szczególności prądy spolaryzowane spinowo. Okazuje się, że proces ten zachodzi przy rezonansowej częstotliwości światła bliskiej dwukrotności potencjału chemicznego. Natomiast w publikacji H5 poszerzono model przez uwzględnienie fali elektromagnetycznej zawierającej orbitalny moment pędu. Pokazano, że odpowiedni wybór parametrów takiej fali pozwala na bardziej precyzyjną kontrolę generowania prądów ładunkowych i spinowych w grafenie. Wyniki oraz wnioski wynikające z tych trzech prac są bardzo ciekawe. Pokazują one, że za pomocą światła, poprzez odpowiedni dobór częstotliwości i polaryzacji, a także podłoża można manipulować prądami i gęstościami spinowymi w grafenie bez konieczności strukturalnych kontaktów z ferromagnetykami. Uważam to za znaczące osiągnięcie wnoszące istotny wkład do naszej wiedzy nt. grafenu oraz jego oddziaływania ze światłem, szczególnie że niesie ono także potencjał do zastosowań w spintronice i optoelektronice.

Prace z tej serii ukazały się w latach 2014-2019. Dwie pierwsze z nich zostały wyraźnie zauważone i docenione, doczekały się już łącznie 65 cytowań (wg. GS). Czytając te wymienione wyżej trzy publikacje narzucało mi się pytanie o możliwość generacji światłem polaryzacji dolinowej. Zbadanie takiej możliwości nie było zapewne możliwe w ramach modelu stosowanego przez autorów. Nieco światła zostało na ten temat rzucone w publikacji H6, w której autorzy badali absorpcję światła w nanowstęgach grafenowych z brzegiem typu armchair i możliwość generowania w ten sposób gęstości pseudospinowej. Wstęgi z takim brzegiem są specyficzne, gdyż doliny K i K' pokrywają się w punkcie Γ (dla kierunku wzdłuż wstęgi), dlatego dla ich rozszczepienia wygenerowania niezerowej dolinowo-

spolaryzowanej gęstości autorzy posłużyli się prostym potencjałem stopniowanym. Temat mieszania dolinowego i relaksacji w kontekście oddziaływania grafenu ze światłem jest niezwykle ciekawy i wymaga dalszych badań. Tu przydałaby się szersza dyskusja m.in. w kontekście poszerzenia badań na grafen wielowarstwowy, w którym, przy odpowiednio modelowanym prostopadłym polu elektrycznym, pojawiają się dolinowo-chronione stany w przerwie energetycznej.

Druga publikacja z cyklu (H2), która ukazała się w *Physical Review B* w 2015 r. poświęcona jest zbadaniu wpływu domieszek w grafenie na jego właściwości termoelektryczne. Podobnie jak w innych publikacjach, i w tej pracy grafen opisany jest prostym modelem jednodolinowym, a domieszki reprezentowane są potencjałami typu delta-Diraca rozmieszczonymi losowo w obydwu podsieciach. Pomimo prostoty użytego modelu autorom udało się wykazać znaczenie rezonansowego rozpraszania w efekcie Seebecka. To ważny wynik, gdyż potwierdza on wymaganie jakim są „ostre” zależności przewodnictwa od energii dla osiągnięcia wysokich wartości współczynnika dobroci termoelektrycznej. Domieszkowany grafen jawi się tu więc jako potencjalny kandydat na uzyskiwanie efektu termoelektrycznego. Autorzy piszą też, że zaobserwowali istotne odchylenia prawa Wiedemanna-Franza od klasycznej wartości liczby Lorentza. Nie cytują jednak pracy w *Nature Communications* 2, 396 z 2011 r. poświęconej naruszeniu tego prawa w przypadku przewodnika quasi-1D. Tu przydałby się komentarz, gdyż ograniczenie wymiarowości do 1D jest w pewien sposób zbieżne z dyskretną naturą domieszek.

Ostatnie dwie publikacje z cyklu habilitacyjnego (H7 i H8) poświęcone są grafenowi poddanemu zarówno oddziaływaniu z warstwą magnetyczną jak i oddziaływaniu SO Rashby w grafenie na podłożu. W szczególności badano strukturę energetyczną grafenu na ścianach domenowych: w H7 – wytworzonych w warstwie magnetycznej, a w H8 – wytworzonych pomiędzy obszarami podłoża różniącymi się znakiem parametru sprzężenia SO Rashby z grafenem, lub przez złożenie obydwu typów domen. W pracy H7 autorzy wykazali, że w obecności zarówno sprzężenia Rashby jak i namagnesowania pojawia się przerwa energetyczna oraz dwa, dwukrotnie energetycznie zdegenerowane pasma chiralne łączące obszary kontinuum walencyjnego i przewodnictwa i zlokalizowane na magnetycznej ścianie domenowej. Pasma te są podobne do krawędziowych, topologicznie chronionych pasm w przypadku grafenu dwuwarstwowego z elektryczną lub „ułożeniową” ścianą domenową, choć w tym przypadku nie są one dolinowo chronione. Interesujące wydaje się pytanie jak oba rodzaje stanów korelowałyby ze sobą w grafenie wielowarstwowym. Wspomniana wyżej degeneracja ma miejsce dla dolin K i K' , z przeciwną i znoszącą się polaryzacją spinową. Autorzy pokazali też, że obszary po obu stronach domeny magnetycznej (o antyrównoległych kierunkach magnetyzacji) charakteryzują się liczbami Cherna $+2$ i -2 (nb. inaczej chyba być nie mogło, jeśli otrzymujemy 4 chiralne stany 1D zlokalizowane na domenie magnetycznej). Ten

niezwykle ciekawy wynik prowadzi do dyskretnej, anomalnej przewodności Halla (QAH) z czterema kwantami przewodności. Jednak ze względu na brak ochrony dolinowej procesy rozpraszania mogą prowadzić tu do tłumienia efektu QAH.

W publikacji H8 pokazano, że sama zmiana sprzężenia Rashby, (tzn. istnienie ścianki domenowej tego typu) choć wprowadza do przerwy energetycznej nowe stany zlokalizowane w obszarze domeny, to nie mają one charakteru chiralnego, liczby Cherna po obu stronach domeny są takie same. Natomiast dodatkowe pojawienie się domeny magnetycznej powoduje, że stany te ponownie łączą obszary pasm walencyjnego i przewodnictwa.

Te dwie niezwykle interesujące publikacje istotnie poszerzają naszą wiedzę na temat właściwości grafenu w obecności oddziaływań magnetycznych i spin-orbita, a zatem wnoszą one znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

Ten skrótowy i wybiórczy opis rezultatów uzyskanych w cyklu prac habilitacyjnych pokazuje, że habilitant systematycznie i wnikliwie badał różne aspekty optycznych, transportowych i magnetycznych właściwości grafenu. Jest on niewątpliwie ekspertem w tej dziedzinie. Choć w swoich badaniach używa prostych modeli to potrafi na ich gruncie uzyskać sporo interesujących rezultatów, także o potencjalnym znaczeniu aplikacyjnym. Prostota stosowanych przybliżeń teoretycznych daje intuicyjny wgląd w naturę opisywanych zjawisk, niemniej interesujące byłoby przeprowadzenie obliczeń także w oparciu o bardziej wyrafinowane modele.

Wśród publikacji dokumentujących oceniane osiągnięcie naukowe nie ma samodzielnej publikacji habilitanta. Wynika to zapewne z faktu, że powstawały one w ramach realizacji grantów, w których dr. Inglot był jedynie wykonawcą. Z opisów zawartych w autoreferacie wynika, że wkładem habilitanta do tych publikacji było zawsze „sformułowanie koncepcji, opracowanie metodologii, wykonanie większości obliczeń analitycznych, wstępne przygotowanie manuskryptu, udział w procesie redakcyjnym publikacji oraz prowadzenie korespondencji z redakcją”. Dominującą rolę kandydata w ich powstanie potwierdzają także oświadczenia współautorów. Nie mam zatem wątpliwości, że przedstawiony do oceny cykl prac stanowi osiągnięcie naukowe autorstwa habilitanta.

Podsumowanie.

Podsumowując stwierdzam, że publikacje składające się na osiągnięcie habilitacyjne reprezentują wysoki poziom naukowy. Przedstawiają one szereg ciekawych i nieoczywistych rezultatów poszerzających naszą wiedzę na temat oddziaływania grafenu ze światłem i polem magnetycznym, a uzyskane rezultaty mogą mieć także znaczenie aplikacyjne. Habilitant bardzo dobrze orientuje się fizyce grafenu, jest biegły w obliczeniach analitycznych, ma spory zasób wiedzy z fizyki ciała stałego, umie pracować w zespołach badawczych. Wszystko to sprawia, że dr. Michał Inglot

jest dojrzałym naukowcem potrafiącym samodzielnie planować i realizować badania naukowe.

Stwierdzam, że osiągnięcia naukowe dr. Michała Inglota stanowią znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne, a tym samym spełniają wymogi stawiane ustawowo osobom ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Wnoszę zatem o nadanie dr. Michałowi Ingotowi stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w ww. dyscyplinie.

Toruń, 05.12.2025

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to read 'P. Ingot'.

