

Dr hab. Ryszard J. Wojciechowski, prof. senior
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
Poznań

Ocena osiągnięcia habilitacyjnego
„Charakterystyka stanu podstawowego wybranych silnie skorelowanych
związków 4f-elektronowych ze szczególnym uwzględnieniem aspektów
transportu elektronowego i cieplnego”
oraz dorobku naukowego Pana dra Michała Falkowskiego

Sylwetka Habilitanta

Pan dr Michał Falkowski ukończył studia na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej i uzyskał tytuł magistra inżyniera w zakresie fizyki materiałów i nanotechnologii w roku 2004. Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki uzyskał, pod kierunkiem dra hab. Andrzeja Kowalczyka; prof. IFM PAN, na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Własności magnetyczne i elektronowe związków międzymetalicznych $RN_{14}Si$ (R =lantanowce)” w roku 2009. Po uzyskaniu stopnia doktora został zatrudniony w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu: od 1 stycznia 2010 do 31 grudnia 2011 na stanowisku fizyka, a od 1 stycznia 2012 do dnia dzisiejszego pracuje na stanowisku adiunkta. Habilitant odbył trzy długoterminowe staże podoktorskie. Od września 2012 do marca 2014 przebywał na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Johannesburgu (Republika Południowej Afryki) w grupie Prof. André M. Strydoma zajmującej się badaniami silnie skorelowanej materii. Od stycznia 2017 do grudnia 2018 odbył staż na Wydziale Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Karola w Pradze (Republika Czeska) w Katedrze Fizyki Ciała Stałego w grupie Prof. Ladislava Haveli. Od stycznia 2019 do grudnia 2019 przebywał w Instytucie Czeskiej Akademii Nauk, Oddział Fizyki Ciała Stałego, Zakład Magnetyków i Nadprzewodników pod kierunkiem przez Ing. Jiří Hejtmánka.

Działalność naukowa dra Falkowskiego dotyczy głównie badań eksperymentalnych wieloskładnikowych układów zawierających pierwiastki ziem rzadkich, które odpowiedzialne są silne korelacje elektronowe. Pomimo intensywnych, wieloletnich badań tych układów prowadzonych w wielu ośrodkach na świecie, ciągle pozostało do rozwiązania wiele fundamentalnych problemów takich jak np. mechanizm powstawania ciężkich fermionów czy też mieszanej wartościowości.

Habiltant od początku swojej kariery naukowej zajmuje się badaniami transportu cieplnego i elektronowego w wieloskładnikowych układach f-elektronowych. Stosuje wiele niezależnych technik eksperymentalnych w badaniach magnetooporu, przewodnictwa cieplnego i elektronowego, termosity, ciepła właściwego, magnetyzacji i podatności magnetycznej. Warto również wspomnieć, że w swoich badaniach bardzo często korzysta z wytworzonych przez siebie próbek.

Badania układów z ziemiami rzadkimi ma niewątpliwie aspekty aplikacyjne. Na przykład obiecujące jest wykorzystanie ich zdolności do absorpcji wodoru w ogniach wodorowych, a układy zawierające samar lub neodym wykorzystywane są do produkcji magnesów trwałych. Również bardzo interesująca jest możliwość wykorzystania efektu termoelektrycznego, obserwowanego w niektórych układach 4f, w lodówkach i generatorach prądu nowej generacji.

Krótkie omówienie i ocena osiągnięcia habilitacyjnego

Osiągnięciem habilitacyjnym przedstawionym przez Pana dr. Falkowskiego jest cykl dziewięciu tematycznie ze sobą powiązanych artykułów naukowych. Prace wchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej (ponumerowane od **H1** do **H9** w dołączonym do dokumentacji habilitacyjnej autoreferacie i wykazie osiągnięć) zostały opublikowane w latach 2012-2019 w czasopismach o dobrym współczynniku wpływu (Impact Factor) spełniającym kryteria bibliometryczne dla habilitacji w Polsce. Prace te stanowią samodzielny dorobek naukowy Habilitanta. Wynika to zarówno z załączonych oświadczeń współautorów jak i z wykazu osiągnięć, w którym Habilitant oszacował swój udział w powstaniu tych prac oceniając go od 60% do 100% (**H3**- 60%, **H6**- 70%, **H1**, **H2**, **H4**, **H7**- **H9**-75%, **H5**-100%). Warto podkreślić, że we wszystkich pracach stanowiących habilitację dr Falkowski jest pierwszym autorem (w ośmiu jest autorem korespondencyjnym), a jedna praca (**H5**) jest monoautorska. Tematyka tych prac jest interesująca i aktualna.

Rozprawa habilitacyjna ma na celu określenie wpływu elektronów 4f na opór elektryczny, magnetoopór, siłę termoelektryczną, i przewodnictwo cieplne w wieloskładnikowych układach zawierających ziemie rzadkie. Do realizacji tego zadania Habilitant wyznaczył sobie następujące cele badawcze:

1. Określenie wpływu składu chemicznego na stan podstawowy ciężkofermionowego związku CeCu_4Al wynikającego z badań siły termoelektrycznej i przewodnictwa cieplnego.

2. Zbadanie wybranych własności fizycznych nowych związków, takich jak $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$, $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$, $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ i $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$.

3. Uzyskanie pełniejszego obrazu dotyczącego własności fizycznych $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$, Ce_3NiGe_2 i YbNiAl_4 na podstawie badań transportu elektronowego i cieplnego.

W pracach **H1** i **H2** badany był ciężkofermionowy układ $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_4\text{Al}$ ($0 < x < 1$). W pracy **H2** wykonano pomiary temperaturowej zależności współczynnika Seebecka $S(T)$ i pokazano, że termosiła jest dodatnia w całym zakresie temperatury i wykazuje maksimum dla każdej wartości x a wyjątkiem układu nie zawierającego ceru ($x=1$). Zaobserwowano również, że większa zawartość lantanu obniża temperaturę Kondo, co wynika ze zmniejszonej hybrydyzacji spowodowanej większym rozmiarem atomu lantanu. Korzystając z modelu jednopasmowego oszacowano szerokość piku pochodzącego od elektronów 4f w pobliżu poziomu Fermiego.

W pracy **H2** określono za pomocą metody proszkowej strukturę krystaliczną badanego związku i pokazano, że w miarę zwiększania zawartości lantanu struktura heksagonalna typu CaCu_5 , zostaje zachowana, aż do izostrukturalnego związku LaCu_4Al . W pracy przeprowadzono również szczegółowe badania przewodnictwa cieplnego.

W pracach **H3** i **H6** badano silnie skorelowany związek $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ oraz jego niemagnetyczny analog $\text{La}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$. W pracy **H3** zaprezentowano po raz pierwszy podstawowe własności fizyczne związku $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$. Przeprowadzono szczegółowe pomiary podatności magnetycznej, magnetyzacji, termosiły, ciepła właściwego, oporu elektrycznego i magnetooporu.

Z kolei w pracy **H6** wykonano pomiary przewodnictwa cieplnego, termosiły oraz oporu elektrycznego w $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ oraz w jego niemagnetycznym analogu $\text{La}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$. Badania obejmowały również szczegółową analizę roli pola krystalicznego. Pokazano, że efekty pola krystalicznego znacząco wpływają na wszystkie własności fizyczne analizowane w pracach **H3** i **H6**. Dodatkowym walorem tych prac jest szczegółowa analiza otrzymanych wyników w oparciu o modele teoretyczne. Warto tutaj wspomnieć, że wpływ pola krystalicznego na własności układów silnie skorelowanych jest bardzo trudnym zagadnieniem zarówno eksperymentalnym jak i teoretycznym. Problemem teoretycznym jest tutaj prawidłowe 'skonstruowanie' stanów wieloelektronowych. Teoria tego zagadnienia bazuje głównie na uproszczonym modelu Cornut-Coqblina sformułowanego w 1972 roku. Z tego modelu korzysta również Habilitant przy interpretacji swoich wyników eksperymentalnych. Podjęcie tej tematyki przez dra Falkowskiego zasługuje na szczególne uznanie.

Prace **H4** i **H7** to kontynuacja poszukiwań i badań nowych związków trójskładnikowych zawierających ziemie rzadkie. Habilitant otrzymał dwa nowe układy polikrystaliczne o stosunku stechiometrycznym 2:3:1, a mianowicie $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ oraz $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$. Pierwszy z nich to układ o mieszanej wartościowości, a drugi wykazuje własności ciężkofermionowe. Praca **H4** zawiera obszerne i szczegółowe informacje dotyczące własności fizycznych związku $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$. Bardzo interesująca jest szczegółowa dyskusja podatności

magnetycznej i namagnesowania, która wyklucza uporządkowanie ferromagnetyczne jako cechę własną tego polikrystalicznego układu.

Praca **H7** zawiera opis własności fizycznych związku $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ izostrukturnego odpowiednika $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$. Przedstawiono w niej szereg wyników dotyczących badań krystalograficznych, magnetycznych, termodynamicznych, transportowych, termoelektrycznych i cieplnych. Pokazano między innymi, że związek ten przechodzi w stan ferromagnetyczny w temperaturze $T_C=8.5\text{K}$. Interesująca i moim zdaniem ważna jest dyskusja dotycząca silnych korelacji i wpływu oddziaływań kwadrupolowych na wartość współczynnika Sommerfelda.

Monoautorska praca **H5** stanowi podsumowanie badań nad własnościami fizycznymi $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ i Ce_3NiGe_2 oraz zawiera nowe, nie spotykane wcześniej w literaturze wyniki badań siły elektromotorycznej i przewodnictwa cieplnego w $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ i Ce_3NiGe_2 oraz w ich izostrukturnych analogach ($\text{Ce} \rightarrow \text{La}$). Pokazano, że $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ i Ce_3NiGe_2 można zaliczyć do układów Kondo z silnymi oddziaływaniami pola krystalicznego. Przeprowadzono szczegółową dyskusję wpływu rozpraszania na fononach na składową sieciową przewodnictwa cieplnego. Habilitant przeprowadził również pomiary w obecności silnego zewnętrznego pola magnetycznego (9T). Pokazały one między innymi, że nie wpływa ono istotnie na termosiłę w $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$, z wyjątkiem niskich temperatur. Wyraźny wpływ pola magnetycznego na termosiłę był obserwowany natomiast dla Ce_3NiGe_2 .

W pracy **H8** kandydat zajął się badaniami temperaturowej zależności przewodnictwa cieplnego oraz oporu elektrycznego w YbNiAl_4 , zaliczanego do układu z mieszaną wartościowością, i skonfrontował otrzymane wyniki z wcześniej zbadanymi wielkościami fizycznymi tego układu, takimi jak podatność magnetyczna, opór elektryczny i ciepło właściwe. Dodatkowo uwzględniono również wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na badane wielkości fizyczne. Ponadto przeprowadzono pomiary magnetooporu. Przeprowadzone badania oraz szczegółowa dyskusja wszystkich wyników zaprezentowanych w pracy pokazują, że YbNiAl_4 należy do układów z mieszaną wartościowością.

Praca **H9** stanowi podsumowanie badań związku $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$. W oparciu o dostępne dane literaturowe autorzy przeprowadzili szczegółową analizę i stwierdzili, że wysokiej jakości polikryształy $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$ należy zaliczyć do grupy związków z mieszaną wartościowością wynikającą z silnej hybrydyzacji pomiędzy elektronami 4f i elektronami pochodzącymi z pasm przewodnictwa.

Jak wynika z dołączonego do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego wykazu osiągnięć naukowych, dr Falkowski osobiście syntetyzował większość związków badanych w jego rozprawie habilitacyjnej.

Wyniki badań dra Michała Falkowskiego zawarte w jego pracy habilitacyjnej są interesujące i wnoszą znaczący wkład do wiedzy o własnościach wieloskładnikowych silnie skorelowanych związków 4f-

elektronowych. Uważam, że uzyskał on wiele interesujących rezultatów. Ograniczę się tutaj do kilku z nich, które moim zdaniem są najważniejsze:

1. Pokazanie na podstawie badań transportu dla $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_4\text{Al}$ mechanizmu przejścia ze stanu ciężkofermionowej sieci Kondo do stanu metalu prostego LaCu_4Al .

2. Zsyntezowanie i kompleksowe zbadanie grupy nowych związków $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$, $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$, $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ i $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$. Na uznanie zasługuje przeprowadzenie przez Habilitanta gruntownej analizy teoretycznej otrzymanych wyników eksperymentalnych w oparciu o dostępne modele teoretyczne. W szczególności zbadano i wyjaśniono wpływ różnych stopni degeneracji multipletu podstawowego jonów ceru na charakterystyki oporu elektrycznego w $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$.

3. Zaklasyfikowanie na podstawie badań przeprowadzonych w pracach **H4** i **H7** związku $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ do grupy związków z mieszaną wartościowością oraz znalezienie fazy ferromagnetycznej w $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$. Dodatkowo uzyskano bardzo interesujący wynik dotyczący $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$, a mianowicie odkryto formowanie się stanu ciężkofermionowego bez udziału spinowego efektu Kondo.

Podsumowując część opinii poświęconej pracom **H1-H9** uważam, że spełniają one warunki do uznania ich za rozprawę habilitacyjną i mogą być podstawą do nadania doktorowi Michałowi Falkowskiemu stopnia doktora habilitowanego. Bardzo wysoko oceniam poziom naukowy publikacji stanowiących osiągnięcie habilitacyjne i wszystkie uzyskane w nich wyniki naukowe. Jestem przekonany, że badania przeprowadzone przez Habilitanta wzbogaciły wiedzę o badanych wieloskładnikowych związkach z silnie skorelowanymi 4f-elektronami.

Ocena aktywności naukowej oraz innych form działalności Habilitanta

Pozostały dorobek naukowy nie wchodzący do rozprawy habilitacyjnej obejmuje 49 publikacji wieloautorskich (z czego 40 zostało opublikowanych po doktoracie), wśród których w 23 dr Falkowski jest pierwszym autorem, w tym w 19 jest równocześnie autorem korespondencyjnym. W 8 pracach jest autorem korespondencyjnym, ale nie pierwszym autorem. Wszystkie prace ukazały się w czasopiśmie znajdujących się na liście Journal Citation Reports. Tematyka tych prac jest zróżnicowana i obejmuje również badania układów, które nie były rozważane w rozprawie habilitacyjnej np. układy f-elektronowe zawierające samar, dysproz czy też uran. Na uznanie zasługuje umiejętność współpracy Habilitanta z teoretykami zajmującymi się obliczeniami struktury elektronowej z pierwszych zasad metodą DFT. Współpraca ta zaowocowała kilkoma publikacjami.

Prace wchodzące do dorobku naukowego (ponumerowane **P1-P49** w załączniku 4 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego) zawierają wiele

interesujących wyników badań. Z pewnością należy do nich podanie warunków formowania się nielandauowskiej cieczy Fermiego w $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Al}_9$ w niskich temperaturach (P40). Innym ciekawym wynikiem jest określenie warunków formowania się i zbadanie charakteru stanu nadprzewodzącego w polikrystalicznym związku $\text{La}_5\text{Ni}_2\text{Si}_3$ [P45].

Wszystkie prace, łącznie z pracami stanowiącymi rozprawę habilitacyjną ukazały się w czasopismach znajdujących na liście Journal of Citation Reports (JCR) z czego 21 prac to artykuły pokonferencyjne. Pozostałe 37 prac to prace oryginalne opublikowane w czasopismach recenzowanych o zasięgu międzynarodowym.

Sumaryczny czynnik wpływu (impact factor) wszystkich $9+49=58$ publikacji dra Falkowskiego znajdujących się w bazie JCR, wynosi 96.382 (zgodnie z rokiem opublikowania). Liczba cytowań według bazy Web of Science (WoS) wynosi 315 (205 bez autocytowań), a indeks Hirsha to $h=10$. Powyższe dane spełniają kryteria bibliometryczne dla prac kandydatów do stopnia doktora habilitowanego z fizyki w Polsce.

Habilitant brał w sześciu projektach badawczych w latach 2009-2019. W jednym realizowanym na Uniwersytecie w Johannesburgu (Republika Południowej Afryki) w latach 2014-2015 był kierownikiem i wykonawcą projektu.

Habilitant wygłosił jeden referat na międzynarodowej konferencji (CCFES2015), która się odbyła w Krakowie w 2015r oraz wygłosił 4 seminaria w zagranicznych ośrodkach naukowych. Prezentował również swoje wyniki na międzynarodowych konferencjach (16 prezentacji plakatowych) oraz krajowych (4 prezentacje plakatowe). Brał udział w 3 szkołach/warsztatach naukowych.

Uważam, że przyszłość i samodzielność naukowa wymagać będzie od kandydata większej aktywności w wygłaszaniu referatów na konferencjach oraz większego zaangażowania w zdobywaniu środków na badania naukowe. W podsumowaniu autoreferatu zabrakło mi informacji o interesujących problemach badawczych, wynikających z jego dotychczasowych badań, i które mogłyby być przedmiotem jego dalszej aktywności naukowej.

Ocena osiągnięć dydaktycznych jest trudną sprawą w przypadku Habilitanta, który jako pracownik Polskiej Akademii Nauk nie ma obowiązków dydaktycznych. Z załączonej przez habilitanta dokumentacji wynika, że dr Falkowski zaangażował się w popularyzację fizyki podczas pobytu na Uniwersytecie w Johannesburgu i przeprowadził wykład dla doktorantów na Uniwersytecie Karola w Pradze. Jego dorobek organizacyjny, to udział w organizacji dwóch warsztatów/szkół.

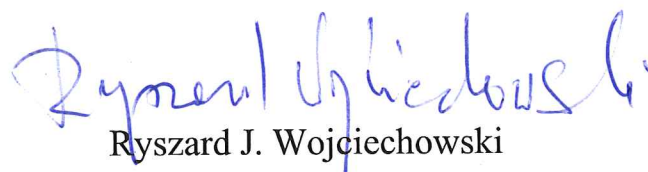
Z dostarczonych dokumentów wynika również, że Habilitant zaprojektował i uczestniczył w budowie układu do precyzyjnego punktowego zgrzewania kontaktów używanych do pomiarów transportu np. do pomiaru oporu elektrycznego czy efektu Hala.

Dr Falkowski recenzował prace dla kilku czasopisma naukowych.

Podsumowanie i ocena końcowa

Działalność naukowa dra Michała Falkowskiego obejmuje szereg ciekawych i aktualnych tematów badawczych. Wyniki prowadzonych przez niego badań poszerzają wiedzę o silnie skorelowanych układach 4f-elektronowych. Bardzo wysoko oceniam uzyskane przez niego wyniki badań. Habilitant wykazał się biegłością w posługiwaniu się wieloma niezależnymi technikami eksperymentalnymi stosowanymi np. do pomiaru termosiły, przewodnictwa cieplnego i elektrycznego, oporu elektrycznego, podatności magnetycznej, magnetooporu, magnetyzacji, oraz ciepła właściwego.

Podsumowując stwierdzam, że dr Michał Falkowski jest wysokiej klasy specjalistą w dziedzinie badań silnie skorelowanych układów 4f-elektronowych, a jego osiągnięcia naukowe, dorobek publikacyjny oraz osiągnięcia we współpracy naukowej z krajowymi i zagranicznymi zespołami badawczymi spełniają wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego i wnoszę o przyjęcie rozprawy habilitacyjnej i o dopuszczenie dra Michała Falkowskiego do kolejnych etapów przewodu habilitacyjnego.



Ryszard J. Wojciechowski

Poznań, dnia 30.04.2021r.