

Prof. dr hab. Andrzej Szytuła
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Jagiellońskiego

Ocena

dorobku naukowego obejmująca rozprawę habilitacyjną pt. "Charakterystyka stanu podstawowego wybranych silnie skorelowanych związków 4f-elektronowych ze szczególnym uwzględnieniem aspektów transportu elektronowego i cieplnego" oraz inne osiągnięcia naukowo-badawcze, organizacyjne i dydaktyczne p. dr Michała Falkowskiego

Informacje o kandydacie

Pan dr Michał Falkowski jest absolwentem Wydziału Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej. Pracę magisterską pt. "Własności magnetyczne i transportowe związków międzymetalicznych lantanowiec-metal 3d" wykonał pod kierunkiem dr hab. Andrzeja Kowalczyka z IFM PAN w Poznaniu. Doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki; fizyki fazy skondensowanej uzyskał w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu w dniu 19 maja 2009 r. Tematem Jego rozprawy doktorskiej były „Własności magnetyczne i elektronowe związków międzymetalicznych) RNi_4Si (R =lantanowiec) a promotorem był ponownie p. dr hab. Andrzej Kowalczyk. Od 1.01.2010 r. do 31.12.2011 r. był zatrudniony jako fizyk a od 1.01.2012 do chwili obecnej jako adiunkt w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu. Jednocześnie przebywał na stażach zagranicznych:

1. wrzesień 2012 - marzec 2014, 19-miesięczny staż podoktorski na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Johannesburgu RPA - stypendium naukowe,
2. styczeń 2017-grudzień 2018, dwuletni staż podoktorski w Wydziale Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Karola w Pradze (Republika Czeska) - zatrudnienie w ramach pełnego etatu,
3. styczeń 2019 - grudzień 2019, roczny staż podoktorski w Instytucie Fizyki Czeskiej Akademii Nauk w Pradze - zatrudnienie na pełnym etacie.

Informacja o habilitacji.

Kandydat jako pracę habilitacyjną przedstawia opracowanie pt. „Charakterystyka stanu podstawowego wybranych silnie skorelowanych związków 4f elektronowych ze szczególnym uwzględnieniem aspektu transportu elektronowego i cieplnego”.

Rozprawa habilitacyjna to 9 publikacji numerowanych od H1 do H9 (ich wykaz zawiera załącznik nr 1), opublikowanych w latach 2012 -2019 w następujących czasopismach: Journal of Alloys and Compounds (3), Journal of Applied Physics (3), Journal of Physics: Condensed Matter (2) and Intermetallics (1). IF tych publikacji jest między 1,857 a 4,175 a sumaryczny IF wynosi 23,542 co daje średnią wartość 2,616 na publikację. Jedna z publikacji (H5) jest jedno-autorska, siedem publikacji jest dwu-autorskie a jedna trój-autorska. Prace są opublikowane w specjalistycznych czasopismach o średnim IF.

Publikacje są powiązane tematycznie przez badane zagadnienia i zastosowaną metodologię badawczą opartą o systematyczne pomiary temperaturowej zależności siły termoelektrycznej i przewodnictwa cieplnego uzupełnione pomiarami podatności magnetycznej i oporu elektrycznego. Habilitant określa swój wkład w powstawanie niejedno-autorskich publikacji na 75% (6), 70% (1) i 60% (1). W 8 publikacjach jest autorem korespondencyjnym. Oświadczenia współautorów podkreślają wiodącą rolę Habilitanta w ich powstaniu.

Do dokumentacji przewodu habilitacyjnego dołączony jest Autoreferat zawierający 31 stron będący streszczeniem najważniejszych wyników z poszczególnych publikacji. Celem podjętych badań jest wyjaśnienie złożonych własności związków międzymetalicznych głównie ceru (7 publikacji). Pozostałe dwie publikacje dotyczą własności związków YbNiAl_4 i $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$. Cztery prace powstały podczas stażu na Uniwersytecie w Johannesburgu, jedna w Pradze a pozostałe w macierzystym instytucie.

Głównym obiektem badań są związki ceru wykazujące złożone własności fizyczne: ciężkie fermiony, mieszaną wartościowość, izolator Kondo. Zróżnicowane własności wynikają z niestabilności powłoki elektronowej 4f pod wpływem oddziaływań z otoczeniem. Mimo wielu lat badań własności tych związków wiele zagadnień jest nie wyjaśnionych i istotnym jest dalsze ich badania. Celem pracy habilitacyjnej jest uzyskanie nowych wyników, które poszerzą wiedzę o własnościach tych związków i będą stanowić wkład do rozwoju fizyki układów 4f-elektronowych. Nowe informacje będą uzyskane głównie w oparciu o wyniki pomiarów transportu elektronowego i cieplnego. Drugim celem badań było poszukiwanie nowych związków ziem rzadkich.

W dalszej części recenzji omówię najważniejsze wyniki zawarte w poszczególnych publikacjach. Publikacje oznaczone jako H1 i H2 zawierają wyniki pomiarów siły termoelektrycznej i przewodnictwa cieplnego związków $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_4\text{Al}$. Prace te są kontynuacją wcześniejszych badań tego układu z udziałem Kandydata opublikowanych w pracach P20, P23, P25, P26, P37, P40 i P42 podanych w spisie publikacji. Są to krótkie publikacje 3 str. (H1) i 5 str. (H2). Temperaturowa zależność siły termoelektrycznej wykazuje maksimum w temperaturze 27 K, które praktycznie nie zależy od koncentracji atomów ceru. Jest to interpretowane, że zmiana koncentracji Ce nie wpływa na zmianę parametrów pola krystalicznego. Wynik pracy H2 zawierający zależność przewodnictwa cieplnego w funkcji koncentracji i temperatury potwierdza wystąpienie spinowego efektu Kondo.

Własności związku $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ omówione w pracach H3 i H6 przedstawiają kompleksowe badania zawierające wyniki pomiarów temperaturowych ciepła właściwego, oporu elektrycznego i siły termoelektrycznej oraz magnetooporu dla wyżej wymienionego związku i izostrukturnego z La. Publikacja stanowi fragment solidnych badań, które prowadzą do w miarę pełnej charakterystyki własności tych związków. Jest to wartościowy fragment rozprawy habilitacyjnej. Wyniki tych pomiarów pozwalają sklasyfikować związek z La jako prosty metal a z Ce jako układ silnie skorelowany, który jest antyferromagnetykiem z temperaturą Néela 1.6 K. Zależność temperaturowa oporu elektrycznego jest typowa dla sieci Kondo. W publikacji H6 przedstawiona jest obszerna analiza własności transportowych poparta symulacjami numerycznymi. Pozwoliło to na oszacowanie wybranych parametrów stanu podstawowego multipletu $^2F_{5/2}$ jonu Ce^{3+} , energii stanów podstawowego i wzbudzonego. Wnioskami wynikającymi z badań tego związku są:

1. silny wpływ pola krystalicznego obserwowany dla większości charakterystyk fizycznych tego związku,
2. wpływ oddziaływań Kondo w obecności silnego potencjału pola krystalicznego.

Obserwowana różnica w temperaturowej zależności przewodnictwa cieplnego między związkami z Ce i La wskazuje na dodatkowe rozpraszanie elektronów na zlokalizowanych momentach 4f. Wyniki zaprezentowane w tych pracach należy zaliczyć do ważniejszych osiągnięć Habilitanta. W kolejnej publikacji H4 prezentowane są wyniki badań związku $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ i izostrukturnego z itrem. Wyniki badań wskazują, że związek ten jest przykładem układu silnie skorelowanego, w którym występuje hybrydyzacja elektronów 4f z elektronami pasma przewodnictwa co w rezultacie należy go zaliczyć do układów z fluktuującą walencyjnością. Dyskutowana w publikacji kwestia istnienia uporządkowania magnetycznego w niskich temperaturach jest kontrowersyjna. Interesującymi wynikami pracy są wyniki analizy pomiarów ciepła właściwego i oporu elektrycznego przynoszące dane o polu krystalicznym (rozszczipienie na 3 dublety). Wyznaczono

wartości składowej elektronowej oporu elektrycznego i współczynnika Sommerfelda ciepła właściwego są charakterystyczne dla układów ciężkofermionowych i Kondo. Według skalowania Kadawakiego-Woodsa omawiany związek należy zaliczyć do układów z mieszaną walencyjnością.

W publikacji H9 prezentowane są wyniki badań związku $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$, które wykazują współistnienie i konkurencję między mieszaną wartościowością i efektem Kondo w szerokim przedziale temperatur. Uzyskane wyniki sugerują postawienie hipotezy o współistnieniu dwóch skali energii oddziaływań pomiędzy elektronami przewodnictwa i spinami 4f. Interesujące wyniki uzyskano w oparciu o wnikliwą charakterystykę transportu elektronowego i cieplnego w kontekście zależności temperaturowej współczynnika Seebecka. Własności transportowe przypominają przebieg typowy dla układów metalicznych w niskich temperaturach i typowy dla układów Kondo w wysokich. Pomiar temperaturowej zależności siły termoelektrycznej jest typowy dla silnie skorelowanych związków ceru i wskazuje na silne korelacje elektronowe i hybrydyzacje elektronów 4f oraz pasma przewodnictwa w pobliżu energii Fermiego. W pracy w oparciu o dane doświadczalne zależności temperaturowej $S(T)$ wyznaczono położenie pasma elektronów 4f względem energii Fermiego oraz szerokość tego pasma.

W publikacji H5 przedstawione są wyniki badań związków $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ i Ce_3NiGe_2 . Prezentowane wyniki pomiarów magnetycznych (Fig. 1) i oporu elektrycznego (Fig. 2) są zgodne z rezultatami prezentowanymi w publikacjach [17] i [20]. Jako recenzent pragnę zwrócić Habilitantowi uwagę, że były one również prezentowane w pracach: *Physica B* 312-3 (2002) 422-4, *Phys. stat. sol. b* 236, No2 364-7 (2003) oraz pracy doktorskiej A. P. Pikula INTiBS 2003. Prezentowane wyniki miały na celu sprawdzenie jakości badanych związków. Nowymi, wartościowymi rezultatami badań są wyniki pomiarów i ich analiza dla siły termoelektrycznej i składowej oporu elektrycznego. Pomiar $S(T)$ dla Ce_3NiGe_2 nie odzwierciedla przebiegu typowego dla ciężkofermionowych związków z siecią Kondo i jest zbliżone do układów z mieszaną wartościowością. Dla związku $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ zależność $S(T)$ wskazuje na współistnienie korelacji pomiędzy oddziaływaniem Kondo oraz potencjałem pola krystalicznego. Wyznaczono składowe 4f-elektronowe w sile termoelektrycznej, które dla obu związków wykazują dwie logarytmiczne zależności podobne jak składowe oporu elektrycznego. Tego typu zależność jest interpretowana jako oddziaływanie typu Kondo. Na podkreślenie zasługuje przeprowadzenie wnikliwej analizy wyników temperaturowej zależności wkładów pochodzących od 4f elektronów do oporu elektrycznego, termosyły i przewodnictwa cieplnego. Pozwoliło to na stwierdzenie, że stan podstawowy w obu związkach jest wynikiem wzajemnego oddziaływania typu Kondo i pola krystalicznego.

Habilitant do rozprawy włączył dwie dodatkowe prace o własnościach związków $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ (H7) i YbNiAl_4 (8H). Włączenie pracy H7 miało na celu porównanie wyników z danymi dla izostrukturnalnego związku z cerem (H4).

Publikacja H7 zawiera informacje o własnościach fizycznych związku $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ uzyskanych z pomiarów magnetycznych, termodynamicznych i transportowych. Badane były również własności termoelektryczne i cieplne w celu uzyskania charakterystyki stanu podstawowego jonu Pr^{3+} . Stwierdzono istnienie uporządkowania ferromagnetycznego w niskich temperaturach a duża wartość współczynnika Sommerfelda wskazuje na obecność silnych korelacji elektronowych związanych z silną hybrydyzacją elektronów 4f z elektronami pasma przewodnictwa. Porównanie zależności temperaturowych termosyły dla związków z Ce i Pr wykazuje prawie liniową zależność, świadcząca o dominującej roli wkładu związanego z dyfuzją nośników pod wpływem gradientu temperatury.

Wyniki badań związku YbNiAl_4 prezentowane w publikacji H8 wskazują na mieszaną wartościowość. Duża wartość współczynnika Seebecka sugeruje istnienie podwyższonych korelacji elektronowych w pobliżu powierzchni Fermiego. Skalowanie Kadawakiego-Woodsa i współczynnik Wilsona wskazują, że w omawianym związku iterb ma wartościowość 2+.

Informacja o innych publikacjach naukowych

Habilitant jest współautorem 58 publikacji naukowych (w tym jednej samodzielnej), oznaczonych od H1 do H9 zaliczanych do rozprawy habilitacyjnej i P1 - P49 (pozostałe). Wszystkie wymienione prace ukazały się w czasopiśmie ujętych w bazie JCR.

40 prac zostało opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora. 21 prac to artykuły pokonferencyjne opublikowane w Acta Physica Polonica A (12), Materials Science-Poland (2), Physica B (2) oraz pojedyncze w Journal Alloys and Compounds, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, IEEE Transactions on Magnetism, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Journal of Low Temperature Physics. Pozostałe 37 publikacji to artykuły regularne opublikowane w Journal Alloys and Compounds (10), Journal of Applied Physics (6), Journal of Magnetism and Magnetic Materials (4), Intermetallics (4), Solid State Communications (3), Journal of Physics: Condens Matter (2), Physical Review B (2), Solid State Sciences (2) oraz pojedyncze prace opublikowane w physica status solidi c, Materials Research Bulletin, Journal of Low Temperature Physics i Philosophical Magazine.

Habilitant określa swój wkład w powstawanie tych publikacji na od 10% (1) do 75% (7) (średni wkład 45%).

Sumaryczny IF powyższych publikacji według listy JCR (zgodnie z rokiem opublikowania) wynosi 96,382. Liczba cytowań według bazy WoS, wynosząca 315 i 205 bez autocytowań oraz indeks Hirscha wynoszący 10 jest dobrym wynikiem.

Tematykę prezentowaną w tych pracach można podzielić na następujące grupy:

1. badanie związane z wpływem zastępowania atomów ceru przez lantan, tzw. "efekt ciśnienia chemicznego" w trój- i czteroskładnikowych związkach,
2. badanie efektu magnetokalorycznego w wybranych 6-ciu związkach międzymetalicznych ziem rzadkich,
3. badanie własności innych związków (5) z tej grupy.

Badania te były prowadzone w IFM PAN.

Kandydat podczas stażu w Johannesburgu oprócz prac zaliczanych do habilitacji opracował 2 publikacje a w Pradze 4.

Habilitant jest współautorem 20 komunikatów konferencyjnych w postaci posterów, w tym 11 po doktoracie. Miał również jedno wystąpienie ustne na konferencji w Krakowie w 2015 roku. Podczas pobytu zagranicą wygłosił jedno seminarium w Johannesburgu i trzy w Pradze. Brał udział w realizacji grantu promotorskiego, 4 projektach MNiSW i NCN oraz w projekcie europejskim w Pradze jako współwykonawca. Był kierownikiem i wykonawcą projektu w Johannesburgu. Był współwnioskodawcą w trzech projektach badawczych na sesje pomiarowe w Berlinie i Trieście.

Odbił trzy staże podoktorskie w ośrodkach zagranicznych. Współpracuje z ośrodkami zagranicznymi na Słowacji, w Czechach, Berlinie i Johannesburgu oraz ośrodkami krajowymi: IF Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, INTiBS PAN we Wrocławiu, IF PAN w Warszawie. Recenzował prace dla czasopism: Journal Alloys and Compounds, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Acta Physica Polonica A, Physica B, RSC Advances.

W Instytucie Fizyki Molekularnej PAN brał udział w projektowaniu i budowie układu do precyzyjnego punktowego zgrzewania kontaktów do pomiarów transportowych.

Działalność dydaktyczna i popularyzatorska nauki

Macierzysty instytut Habilitanta to placówka o badawczym profilu o ograniczonej działalności dydaktycznej, stąd doświadczenie w tym zakresie zdobył podczas pobytu na stażach zagranicznych:

1. na Uniwersytecie w Johannesburgu w ramach "dni otwartych" oprowadzał kandydatów na studia po laboratorium PPMS i prezentował eksperyment w zakresie niskich temperatur,

2. na Uniwersytecie Karola w Pradze wygłosił referat o zjawisku transportu elektrycznego i cieplnego oraz pomiary tych wielkości na aparaturze PPMS dla studentów i doktorantów.

Podsumowanie

Tematyka badawcza Habilitanta od początku opracowania pracy magisterskiej koncentruje się na badaniu własności związków międzymetalicznych ziem rzadkich. Prace Habilitanta, również zaliczone do rozprawy habilitacyjnej dotyczą ciągle aktualnej tematyki własności elektronowych związków ziem rzadkich z silnie skorelowanymi elektronami 4f.

Habilitant w oparciu o przeprowadzone badania zrealizował cele rozprawy:

1. uzyskał nowe informacje o własnościach elektronowych badanych związków,
2. otrzymał nowe związki i zbadał ich własności.

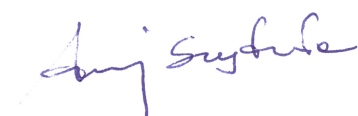
Wyniki uzyskane przez Habilitanta oceniam pozytywnie. Wykazały, że jest doświadczonym fizykiem doświadczalnym, umiejącym prowadzić badania przy pomocy różnych metod badawczych i posiadającym wiedzę teoretyczną, umożliwiającą interpretację wyników badań. Na podkreślenie zasługuje również umiejętność przygotowania związków do badań.

Uzyskane wyniki stanowią istotny wkład w fizykę układów 4f-elektronowych z silnie skorelowanymi elektronami.

Drobnym minusem przesłanej dokumentacji jest brak w podsumowaniu w Autoreferacie syntezy uzyskanych wyników i podanie np. informacji o ewentualnych zastosowaniach. Brakuje informacji o wartości współczynnika dobroci ZT, określającego przydatność danego materiału termoelektrycznego.

Powyższa uwaga nie wpływa na pozytywną ocenę aktywności naukowej Habilitanta i uzyskanych przez Niego wyników, a praca spełnia warunki rozprawy habilitacyjnej.

W oparciu o przedstawioną powyżej charakterystykę, w szczególności w zakresie działalności naukowo-badawczej oraz wyniki, prezentowane w rozprawie habilitacyjnej uważam, że Habilitant spełnia wymogi określone w art. 228 ust. 3 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) do nadania Mu stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk fizycznych. Popieram wniosek Rady Naukowej Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu o nadanie p. dr Michałowi Falkowskiemu stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk fizycznych.



Załącznik nr 1.

- [H1] M. Falkowski, A. Kowalczyk, "Thermopower of $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_4\text{Al}$ intermetallic compounds", *Intermetallics* 20 (2012) 173-175.
- [H2] M. Falkowski, A. Kowalczyk, "Thermal conductivity of $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_4\text{Al}$ alloys", *Journal of Applied Physics* 111 (2012) 093725.
- [H3] M. Falkowski, A.M. Strydom, "Crystalline field effect and magnetic ordering in the heavy fermion Kondo lattice $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ ", *Journal of Alloys and Compounds* 613 (2014) 204-212.
- [H4] M. Falkowski, A.M. Strydom, "Cooperative magnetic behaviour in the new valence fluctuating compound $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ ", *Journal of Physics: Condensed Matter* 27 (2015) 395601.
- [H5] M. Falkowski, "Thermal and electron transport properties of $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ and Ce_3NiGe_2 : Example of Kondo behavior in the presence of the crystalline field effect", *Journal of Alloys and Compounds* 689 (2016) 1059-1067.
- [H6] M. Falkowski, D. Krychowski, A.M. Strydom, "Detailed investigation of thermal and electron transport properties in strongly correlated compound $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ and its nonmagnetic analog $\text{La}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ ", *Journal of Applied Physics* 120 (2016) 195106.
- [H7] M. Falkowski, A.M. Strydom, "A new ternary magnetically ordered heavy fermion compound $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$: magnetic, electronic and thermodynamic properties", *Journal of Physics: Condensed Matter* 29 (2017) 395601.
- [H8] M. Falkowski, A. Kowalczyk, "Thermal and electron transport studies on the valence fluctuating compound YbNiAl_4 ", *Journal of Applied Physics* 123 (2018) 175106.
- [H9] M. Falkowski, L. Horák, "Revisiting the physical properties of $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$: Intermediate valence, or Kondo lattice system?", *Journal of Alloys and Compounds* 773 (2019) 462-469.