



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

prof. dr hab. inż.
Zbigniew Kąkol

Ocena rozprawy habilitacyjnej
"Charakterystyka stanu podstawowego wybranych silnie
skorelowanych związków 4f-elektronowych ze szczególnym
uwzględnieniem aspektów transportu elektronowego i cieplnego"
oraz dorobku naukowego dr Michała Falkowskiego.

Dr Michał Falkowski ukończył, w 2004 roku, studia w zakresie fizyki materiałów i nanotechnologii na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej i uzyskał tytuł zawodowy magistra inżyniera.

Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki; fizyki fazy skondensowanej uzyskał w 2009 roku, na podstawie rozprawy "Własności magnetyczne i elektronowe związków międzymetalicznych RNi_4Si (R = lantanowiec)" wykonanej w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu.

Następnie przebywał na stażach podoktorskich: na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Johannesburgu (Republika Południowej Afryki), na Wydziale Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Karola w Pradze (Republika Czeska) oraz w Instytucie Fizyki Czeskiej Akademii Nauk w Pradze.

Działalność naukowa dr Falkowskiego jest związana z badaniami silnie skorelowanych układów 4f-elektronowych, głównie zawierających Cer, pod kątem poszukiwania nowych materiałów, nowych faz związków na bazie ziem rzadkich ze szczególnym uwzględnieniem wpływu silnych korelacji elektronowych na stan podstawowy w tych układach i w konsekwencji na transport elektronowy i cieplny w odniesieniu do ich własności termoelektrycznych.

Badania te doprowadziły do powstania szeregu prac dotyczących własności związków:

- $Ce_{1-x}La_xCu_4Al$
- $Ce_6Pd_{12}In_5$
- Ce_2Rh_3Ge i Pr_2Rh_3Ge
- $Ce_2Ni_3Ge_5$ i Ce_3NiGe_2
- $YbNiAl_4$
- $Ce_2Ru_3Ga_9$

prof. dr hab. inż. Zbigniew Kąkol
Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 31 56
e-mail: kakol@agh.edu.pl, <http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~kakol/>

Przedstawione do oceny osiągnięcie habilitacyjne to cykl 9 prac, dotyczących wymienionych materiałów, opublikowanych w latach 2012 – 2019. Prace te traktują w sposób wszechstronny własności termoelektryczne układów na bazie ziem rzadkich z Cerem. To zagadnienie jest oryginalnym i interesującym problemem badawczym. Z jednej strony układy 4f-elektronowe z silnymi korelacjami elektronowymi są obiektem szerokich badań ze względu na występujące w nich stany ciężkofermionowe, efekt Kondo czy stany z mieszaną walencyjnością. Badania mechanizmów fizycznych prowadzących do wyżej wymienionych zjawisk są przedmiotem intensywnych badań. Z drugiej strony badane są potencjalne możliwości praktycznego wykorzystania tych materiałów. Jeden z takich aspektów aplikacyjnych wiąże się ze wzrostem zainteresowania nowymi materiałami termoelektrycznymi.

Generatory termoelektryczne, wykorzystujące różnicę temperatur do wytwarzania napięcia elektrycznego oraz chłodziarki termoelektryczne, są urządzeniami nie zawierającymi ruchomych elementów, a dzięki temu prostymi i niezawodnymi. Moduły termoelektryczne znajdują zastosowanie praktyczne zarówno w prostych, komercyjnych urządzeniach, jak i wysoko wyspecjalizowanej aparaturze.

Złożoność zjawisk fizycznych, determinujących własności tych materiałów, powoduje, że materiały termoelektryczne stanowią niezwykle ciekawy obszar badań podstawowych z zakresu fizyki ciała stałego i mechaniki kwantowej, łącząc badania podstawowe z aplikacyjnymi. Przykładem mogą tu być dobrze rokujące materiały półprzewodnikowe zawierające domieszki rezonansowe.

Wyzwaniem chwili jest znalezienie materiałów o wydajności wyższej niż silników spalinowych czy klasycznych chłodziarek opartych na rozprężeniu gazu.

Kluczem do poprawy wydajności elementów termoelektrycznych jest znalezienie materiału o jak najwyższym tzw. współczynniku dobroci, zależnym od termosyły i przewodnictwa elektrycznego. Zagadnienie to jest o tyle trudne, że wielkości wchodzące do współczynnika dobroci mają przeciwne tendencje, tzn. materiał wykazujący wysokie przewodnictwo elektryczne zazwyczaj ma niski współczynnik Seebecka. Dlatego szczegółowa znajomość tych wielkości jest ważna i w pełni uzasadnia wybór tematyki badań naukowych przedstawionych do oceny.

Wszystkie zgłoszone prace ukazały się w dobrych czasopismach o zasięgu międzynarodowym:

[H1] – Intermetallics (100 pkt.);

[H2], [[H6], [H8] - Journal of Applied Physics (70 pkt.);

[H3], [H5] - Journal of Alloys and Compounds (100 pkt.);

[H4], [H7] - Journal of Physics: Condensed Matter (70 pkt.).

Tym samym spełniony jest warunek opublikowania pracy habilitacyjnej.

Na uwagę zasługuje tu monoautorska praca [H5] co uważam za znaczące osiągnięcie Habilitanta.

Obowiązkiem recenzenta jest ustalenie w jakim stopniu zgłoszone prace stanowią samodzielny dorobek naukowy Habilitanta. Informują o tym oświadczenia współautorów dołączone do przewodu habilitacyjnego. A. M. Strydom (Department of Physics of the Faculty of Science at the University of Johannesburg, South Africa) współautor prac [H3], [H4], [H6] i [H7] stwierdza, że koncepcja badań, identyfikacja materiału tematycznego i sformułowanie metodologii badań są wyłącznym osiągnięciem dr Falkowskiego i że dr Falkowski był wiodącym autorem wyżej wymienionych prac. Z kolei dr D. Krychowski (Instytut Fizyki Molekularnej PAN) oświadcza, że jego wkład do pracy [H6] był związany z opracowaniem kodu numerycznego użytego do opisu i symulacji danych eksperymentalnych. Natomiast udział współautora pracy [H9] mgr L. Horaka (Instytut Fizyki Czeskiej Akademii Nauk w Pradze) dotyczył pomiarów dyfrakcji promieniowania X. Wreszcie dr hab. A. Kowalczyk (Instytut Fizyki Molekularnej PAN) stwierdza, że jego udział w pracach [H1], [H2] i [H8] sprowadzał się do udziału w interpretacji wyników eksperymentalnych.

W związku z tymi oświadczeniami stwierdzam, że wszystkie 9 prac wchodzących w skład rozprawy stanowią samodzielny dorobek Habilitanta (jego wkład pracy był dominujący) i **mogą być rozpatrywane jako podstawa do uzyskania przez dr Falkowskiego stopnia doktora habilitowanego.**

W kolejności, przedstawiam sumaryczne omówienie wyników zawartych w opublikowanych pracach, wchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej zwracając uwagę na najważniejsze wyniki i osiągnięcia Habilitanta.

- [H1] Głównym wynikiem pracy są pomiary termosiły dla serii polikrystalicznych próbek serii $Ce_{1-x}La_xCu_4Al$. Praca ma charakter eksperymentalny, a istotny jest tu wynik, że obserwuję się pik w zależności temperaturowej termosiły (niezależny od koncentracji Ce), którego występowanie można przypisać konkurencyjnym efektom pola krystalicznego i efektowi Kondo.

- W pracy [H2] zbadano i przeanalizowano przewodnictwo cieplne serii $Ce_{1-x}La_xCu_4Al$. Przedstawione zostały wyniki pomiarów przewodności cieplnej w funkcji temperatury w zakresie od 2 K do 300 K. Istotnym wynikiem jest obserwowane zmniejszanie przewodności cieplnej. Porównanie wyników doświadczalnych z przewidywaniami teorii wskazują na konieczność uwzględniania oddziaływań typu Kondo w analizie przewodnictwa cieplnego i elektrycznego w materiałach na bazie ziem rzadkich. To najważniejszy wniosek.

- Prace [H3] i [H6] dotyczą kompleksowych badań związku $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ oraz jego niemagnetycznego odpowiednika $\text{La}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$. Wykonane zostały pomiary temperaturowych zależności ciepła właściwego, przewodnictwa elektrycznego i cieplnego oraz termosiły. Najważniejsze osiągnięcia to: wykazanie, że własności transportowe związku z Cerem są zdominowane przez oddziaływanie Kondo w obecności silnego pola krystalicznego; układ wykazuje cechy sieci Kondo. Stwierdzono, że przewodnictwo cieplne $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ jest mniejsze niż w $\text{La}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ w całym dostępnym zakresie temperatur co zinterpretowano jak wynik dodatkowego rozpraszania elektronów 4f na zlokalizowanych momentach powodującego zmniejszenie przewodności cieplnej.

Na uwagę zasługuje również to, że związek $\text{Ce}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$ oraz jego niemagnetyczny izostrukтурalny odpowiednik $\text{La}_6\text{Pd}_{12}\text{In}_5$, jest nową fazą międzymetaliczną, której podstawowe własności fizyczne przedstawiono, jak podaje Habilitant, po raz pierwszy w pracy [H3].

- Badania przedstawione w pracach [H4] i [H7] dotyczą określenia podstawowych własności fizycznych związków $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ i $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ na podstawie pomiarów podatności magnetycznej, ciepła właściwego, przewodnictwa elektrycznego i cieplnego. Uzyskano szereg ciekawych rezultatów. Na podstawie pomiarów niskotemperaturowego ciepła właściwego stwierdzono, że współczynnik Sommerfelda ma znacznie wyższą wartość niż w zwykłych metalach wskazując na ciężkofermionowy charakter stanu podstawowego w związku z Prazeodymem. Analiza wyników doświadczalnych, a zwłaszcza zmierzona niska wielkość współczynnika Seebecka wskazuje jednak, że nie mamy do czynienia z układem z silnymi korelacjami elektronowymi. Habilitant zaproponował wyjaśnienie obecności stanu ciężkofermionowego jako wynikającego z nisko poziomowych fluktuacji/wzbudzeń elektronów pomiędzy stanem podstawowym a sąsiednim, nisko wzbudzonym poziomem krystalicznym (dynamiczne oddziaływania pola krystalicznego). Wyniki nie wydają się być ostateczne i wymagają dalszych badań, uzupełnienia.

- Przedstawione w pracy [H5] rezultaty pomiarów termosił i przewodnictwa cieplnego związków $(\text{Ce}, \text{La})_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ i $(\text{Ce}, \text{La})_3\text{NiGe}_2$ są pierwszymi informacjami w literaturze na temat tych wielkości fizycznych. To stanowiło motywację Habilitanta do prowadzenia tych badań, które stanowią jego istotny sukces. Z pomiarów zależności temperaturowej oporności elektrycznej i termosiły wynika, że $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ i Ce_3NiGe_2 są układami Kondo z silnymi oddziaływaniami z polem krystalicznym. Zbadany został również wpływ pola magnetycznego na termosiły w obu związkach. Uzyskano ciekawe wyniki. Pole magnetyczne (do 9 T) nie wpływa na siłę termoelektryczną związku $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ poza obszarem niskich temperatur (gdzie układ porządkuje się

magnetycznie). Natomiast dla Ce_3NiGe_2 zaobserwowano wyraźny wpływ pola magnetycznego na zmiany termosiły.

- Praca [H8] dotyczy badań siły termoelektrycznej, przewodnictwa cieplnego, magnetooporu oraz oporu elektrycznego związku YbNiAl_4 z mieszaną walencyjnością ($\text{Yb}^{3+/2+}$). Praca ta stanowi kontynuację wcześniejszych badań z udziałem Habilitanta. Prezentowane wyniki mają głównie na celu uzupełnienie i usystematyzowanie wiedzy na temat tego układu z mieszaną walencyjnością.

- W ostatniej ocenianej pracy [H9], podobnie jak w pozostałych publikacjach przedstawiane i dyskutowane są wyniki pomiarów przewodnictwa elektrycznego i cieplnego, tu dla związku $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$. Uzyskane wyniki wskazują na współistnienie, a zarazem na konkurowanie pomiędzy stanami Ce z mieszaną walencyjnością, a oddziaływaniami typu Kondo.

Podsumowując w pracach [H1]-[H9] przedstawiono szereg wyników eksperymentalnych dotyczących związków cerowych i ich dyskusję/analizę pod kątem: badania stanu podstawowego, oddziaływań Kondo, wpływu pola krystalicznego, uporządkowania magnetycznego. Prace te mają zdecydowanie charakter prac eksperymentalnych, w których na pierwsze miejsce zdecydowanie wybijają się badania własności termoelektrycznych i cieplnych. Za ważne uważam również badania nowo otrzymanych faz związków z Cerem. Nasuwa się tu jedna uwaga, że ważne byłoby przeprowadzenie komplementarnych pomiarów na próbkach monokrystalicznych, co jest szczególnie ważne w przypadku obserwowanych anomalii np. w temperaturowej zależności podatności magnetycznej. Z drugiej strony zdaję sobie sprawę uzyskanie dobrej jakości monokryształów może być trudne ze względu na problem wielofazowości badanych związków.

Na zakończenie pragnę podkreślić kompleksowość i szczegółowość uzyskanych wyników, których prezentację uważam za bardzo dobrą.

Podobnie wysoko oceniam autoreferat, który stanowi obszerne podsumowanie uzyskanych wyników i mógłby być z powodzeniem traktowany jako artykuł przeglądowy. Istotną jego zaletą jest uporządkowanie wyników z prac przedstawionych w ramach habilitacji.

Podsumowując, uważam, że badania prowadzone przez Habilitanta istotnie wzbogacają naszą wiedzę o badanych związkach z silnymi korelacjami elektronowymi.

Dorobek naukowy dr Falkowskiego obejmuje również 49 prac nie objętych rozprawą habilitacyjną. Swoją udział w tych pracach Habilitant deklaruje na 20% do 70%. Większość prac jest opublikowana w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, w tym 2 w *Physical Review B*.

Liczba cytowań publikacji autorstwa/współautorstwa dr Falkowskiego = 315 (205 bez autocytowań). Wynik ten oznacza średnio ponad 5 cytowań na pracę co jest wynikiem nieco niższym od średniej światowej (według WoS 7 cytowań na pracę z fizyki). Wartość indeksu Hirscha $H=10$ (dane z WoS) jest typowa na tym etapie kariery naukowej w fizyce.

Habilitant brał udział w 20 międzynarodowych i krajowych konferencjach, gdzie prezentował swoje osiągnięcia na sesjach plakatowych i wygłosił 1 referat.

Dr Falkowski kierował jednym projektem badawczym w trakcie stażu na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Johannesburgu (Republika Południowej Afryki). Jako wykonawca brał udział w 4 projektach badawczych.

Wszystkie wymienione przeze mnie informacje/oceny pozwalają mi na sformułowanie opinii, że dr Falkowski uzyskał wartościowe wyniki w swojej pracy habilitacyjnej i posiada dobre przygotowanie do samodzielnej pracy naukowej. Dorobek naukowy dr Falkowskiego oceniam jako wystarczający i spełniający przyjęte wymagania dla kandydatów do stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym.

W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy habilitacyjnej dr Michała Falkowskiego i dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Zbigniew Kąkol

