

Ocena Osiągnięcia naukowego Michała Falkowskiego przedstawionego w postępowaniu habilitacyjnym

Doktor Michał Falkowski przedstawił jako Osiągnięcie naukowe mające stanowić podstawę nadania mu stopnia doktora habilitowanego cykl dziewięciu artykułów z lat 2012–2019 zatytułowany: *Charakterystyka stanu podstawowego wybranych silnie skorelowanych związków 4f-elektronowych ze szczególnym uwzględnieniem aspektów transportu elektronowego i cieplnego*.

Ocena artykułów składających się na Osiągnięcie

Wszystkie dziewięć artykułów to dość obszerne, oryginalne prace w cieszących się dobrą renomą czasopismach: *Intermetallics* (1 artykuł), *Journal of Applied Physics* (3 artykuły), *Journal of Alloys and Compounds* (3 artykuły) i *Journal of Physics: Condensed Matter* (2 artykuły). Wart podkreślenia jest fakt, że we wszystkich przypadkach dr Michał Falkowski jest pierwszym, a w ośmiu również korespondującym, autorem tych prac.

Habilitant przedstawił oświadczenia wszystkich czterech współautorów prac składających się na osiągnięcie. W swym oświadczeniu prof. André M. Strydom zaprezentował dość szczegółową pochwałę wkładu Habilitanta w powstanie czterech wspólnych prac, ale nie umieścił tam opisu swojego udziału w ich powstaniu. Z przedstawionych oświadczeń wynika jednoznacznie, że wkład Habilitanta był dominujący na każdym etapie powstawania prac składających się na Osiągnięcie.

Uszeregowane chronologicznie artykuły są powiązane tematycznie, dr Falkowski skoncentrował się na kilku międzymetalicznych związkach pierwiastków 4f-elektronowych (Ce, Pr i Yb) i jednym roztworze stałym ($\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_4\text{Al}$), badając ich własności transportowe (elektronowe i cieplne) oraz termodynamiczne (ciepło właściwe, namagnesowanie).

Niektóre z badanych materiałów to „nowe” fazy, czyli takie, których własności fizyczne (poza strukturami krystalicznymi) przedstawione w pracach H3, H4, H6 i H7, były pierwszy raz opisane w literaturze. Habilitant do prac opisujących „nowe” fazy zaliczył również tę oznaczoną H9, ale uważam to za zaniedbanie, bo wcześniejsza praca na temat związku $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$ [N. Kumar, K. V. Shah, R. Nagalakshmi, and S. K. Dhar, (2010) *Journal of Applied Physics* 107:09E113 <https://doi.org/10.1063/1.3365068>] jest omawiana w Autoreferacie i cytowana w artykule H9, którego tytuł „*Revisiting the physical properties of $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$: Intermediate valence, or Kondo lattice system?*” mówi sam za siebie.

Dziewięć artykułów składających się na Osiągnięcie uzyskało łącznie 49 cytowań (35 bez autocytowań Habilitanta), co świadczy o istotnym zainteresowaniu środowiska naukowego wynikami pracy dra Michała Falkowskiego.

W pracach H1 i H2, wykonanych wspólnie z prof. Andrzejem Kowalczykiem (który był promotorem pracy doktorskiej Habilitanta obronionej w roku 2009), a opublikowanych w roku 2012, jeszcze przed wyjazdem dr. Falkowskiego na staż u prof. Strydoma, opisano komplementarne wyniki pomiarów siły termoelektrycznej i przewodnictwa cieplnego roztworu stałego $Ce_{1-x}La_xCu_4Al$. Były one kontynuacją i rozszerzeniem wcześniejszych prac obu Autorów i dra T. Tolińskiego dotyczących oporu elektrycznego, magnetooporu, ciepła właściwego i podatności magnetycznej tego samego roztworu, pokazujących ewolucję stanu podstawowego od ciężko-fermionowej sieci Kondo, poprzez lokalny, jednojonowy układ Kondo, aż do całkowitej eliminacji oddziaływania Kondo. Szkoda, że te nowsze badania nie objęły składu z $x=0.8$, a to dlatego, że zmiany zarówno współczynnika Seebecka, jak i liczby Lorentza są najbardziej spektakularne między $x=0.6$ a 1. W zasadzie rezultaty prac H1 i H2 potwierdziły konkluzje wcześniejszych badań, ale dostarczyły też (zwłaszcza analiza siły termoelektrycznej) nowych cennych informacji o parametrach struktury elektronowej.

Opisany w pracach H3 i H6 związek $Ce_6Pd_{12}In_5$ to także ciężkofermionowa sieć Kondo, a ponieważ H3 była pierwszym doniesieniem o jego własnościach fizycznych, to zakres wykonanych w niej badań jest znacznie szerszy (w porównaniu z H1 i H2) i obejmuje (oprócz potwierdzenia struktury krystalicznej) magnetyzm, ciepło właściwe, siłę termoelektryczną, opór i magnetoopór. Publikacja zawiera także solidną analizę uzyskanych wyników (oprócz siły termoelektrycznej) za pomocą modeli adekwatnych dla związków ceru, z wykorzystaniem równocześnie zebranych danych o niemagnetycznym odpowiedniku $La_6Pd_{12}In_5$. Badany związek okazał się ciekawym przykładem antyferromagnetyka, gdzie energie oddziaływań RKKY i Kondo są do siebie zbliżone, a układ poziomów elektrycznego pola krystalicznego (CEF) ma zasadnicze znaczenie dla stanu podstawowego.

Artykuł H6 stanowi poszerzenie badań przedstawionych w H3 o pomiary przewodnictwa cieplnego oraz pogłębioną analizę oporności elektrycznej i cieplnej, odpowiednio za pomocą modeli: Cornut-Coqblin i Bhattacharjee-Coqblin, uwzględniających równocześnie zjawisko Kondo i rozszczepienie poziomów CEF. Oba modele przyniosły parametry o zbliżonych wartościach. Również dla siły termoelektrycznej zakresy występowania logarytmicznej

zależności temperaturowej były takie same jak dla obu oporności. W rezultacie otrzymano bardzo spójny, kompleksowy opis zjawisk transportowych w badanym związku.

Praca H4 to opis badań nowego związku $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$. Zestaw przeprowadzonych eksperymentów jest tu taki sam jak w poprzedniej publikacji (H3), ale uzupełniony o zbadanie przewodnictwa cieplnego, z tym że za niemagnetyczny odpowiednik posłużył tu $\text{Y}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$. Uzyskane wyniki pozwoliły Autorom wywnioskować, że $\text{Ce}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ to układ z fluktuującą wartościowością jonów ceru oraz ferromagnetycznym uporządkowaniem ich momentów.

Kolejna praca H5 (jedno-autorska) dotyczy dwóch faz z cerem: $\text{Ce}_2\text{Ni}_3\text{Ge}_5$ and Ce_3NiGe_2 i ich niemagnetycznych odpowiedników, gdzie cer zastąpiono lantanem. Habilitant zbadał ich podatność i namagnesowanie oraz własności transportowe: opór elektryczny, siłę termoelektryczną i przewodnictwo ciepła. Dwa ostatnie zjawiska zbadano dla tych związków po raz pierwszy, a demonstracja i analiza wpływu pola magnetycznego na rozszczepienie poziomów pola krystalicznego w pierwszym z badanych związków jest moim zdaniem najciekawszym aspektem tej pracy.

Związek prazeodymu $\text{Pr}_2\text{Rh}_3\text{Ge}$ (izostrukturalny odpowiednik związku ceru opisanego w H4) jest przedmiotem badań opisanych w pracy H7. Autorzy użyli tu tych samych co poprzednio metod eksperymentalnych i pokazali, że jest to ciężkofermionowy układ, co bardzo ciekawe powstały bez udziału zjawiska Kondo, ale dzięki dynamicznym fluktuacjom nisko położonych poziomów pola krystalicznego. Zaobserwowano również długo-zasięgowe uporządkowanie ferromagnetyczne cechujące się silną anizotropią magnetokrystaliczną. Autorzy dopatrzili się również śladów pojawiania się fazy antyferromagnetycznej w słabych polach magnetycznych, ale moim zdaniem jest to wniosek pochopny, bo „diagram fazowy” B - T_{max} we wstawce do rysunku 4b nie ma wystarczającego oparcia w danych ciepła właściwego pokazanych w głównym panelu tego rysunku.

Artykuł H8 (podobnie jak to było w przypadku prac H1 i H2) jest rozszerzeniem wcześniejszej pracy [A. Kowalczyk, M. Falkowski, T. Toliński (2010) *J. Appl. Phys.* 107:123917] na temat oporu elektrycznego, ciepła właściwego i podatności magnetycznej związku YbNiAl_4 o wyniki pomiarów siły termoelektrycznej magnetooporu i przewodnictwa cieplnego. Praca ta znacząco uzupełniła obraz własności stanu podstawowego badanego związku o fluktuującą wartościowość iterbu, ale nie przyniosła żadnych zaskakujących rezultatów: własności termoelektryczne są typowe dla związku iterbowego o umiarkowanie silnych korelacjach

elektronowych, magnetoopór zachowuje się podobnie jak w większości metali o słabej kompensacji ładunkowej nośników, a przewodnictwo ciepła pochodzi głównie od elektronów przewodnictwa zhybrydizowanych z elektronami 4f.

Słaby udział fononowy przynajmniej w części przypisywany jest (podobnie jak w pracach H2, H5, H6, i H7) anharmonicznym drganiom atomów (*rattling*), co wydaje się słabo uzasadnione dla stosunkowo gęsto upakowanych struktur krystalicznych, gdzie trudno wskazać atomy, które miałyby „grzechotać”. Czy nie większą rolę odgrywa tu rozpraszanie fononów na granicach ziaren polikrystalicznego materiału? Z pewnością powtórzenie pomiarów przewodnictwa cieplnego na próbkach monokrystalicznych rozstrzygnęłoby tę wątpliwość.

Ostatnia z publikacji składających się na Osiągnięcie (H9) dotyczy związku $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$. Nie jest to „nowa” faza, bo wcześniej ukazały się wspomniana już praca Kumar, Shah, Nagalakshmi and Dhar (2010) oraz pokonferencyjna praca Habilitanta i prof. Strydoma (prezentująca przewodnictwo cieplne związku). Praca zespołu hinduskiego zawiera wartościowe wyniki pomiarów ciepła właściwego, podatności magnetycznej i oporu elektrycznego, i na ich podstawie postuluje współistnienie mieszanej wartościowości i oddziaływań typu Kondo. Nie umniejsza to jednak wartości pracy H9. Pomiary podatności magnetycznej i oporu elektrycznego, których rezultaty w niej opisano, wykonano w znacznie rozszerzonych zakresach temperatur (odpowiednio do 1000 i 400 K), co pozwoliło zaobserwować około 330 K maksima obu tych wielkości. Również magnetoopór $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$ opisany w H9 zmienia drastycznie swe zachowanie powyżej 320 K. Co ciekawe w pracy grupy hinduskiej opisano podobne anomalie podatności i oporu, ale położone nieco poniżej 100 K. Szkoda, że Habilitant nie pokusił się o dyskusję uderzających różnic niemal wszystkich (bo również ciepła właściwego) własności fizycznych $\text{Ce}_2\text{Ru}_3\text{Ga}_9$ przedstawionych w pracach: Kumar, Shah, Nagalakshmi and Dhar (2010) i H9 (choć opisane struktury krystaliczne materiałów są niemal identyczne) ani też o próbę dociekania źródła tych różnic. Być może taka dyskusja pozwoliłaby na bardziej precyzyjną konkluzję co do stanu podstawowego badanego związku.

Stwierdzam, że przedstawione mi do oceny Osiągnięcie naukowe Habilitanta wskazuje na jego znaczący wkład w poznanie własności związków 4f-elektronowych z silnymi korelacjami elektronowymi. Uważam, że odpowiada ono wymaganiom określonym w art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy i może stanowić podstawę nadania dr. Michałowi Falkowskiemu stopnia doktora habilitowanego.

Pozostała aktywność naukowa Habilitanta

Po uzyskaniu w roku 2009 stopnia doktora Habilitant opublikował, oprócz wchodzących w skład Osiągnięcia, 21 artykułów w dobrych recenzowanych czasopismach. W większości przypadków był ich pierwszym lub korespondującym autorem. Wszystkie prace Habilitanta były cytowane ponad 330 razy (220 bez autocytowań). Są to dobre parametry na obecnym etapie jego kariery naukowej. Słabo natomiast przedstawia się aktywność konferencyjna – tylko jedno wystąpienie ustne i 20 prezentacji plakatowych (choć w większości na spotkaniach o charakterze międzynarodowym).

Habilitant odbył dwa długotrwałe staże podoktorskie: 19-miesięczny w Johannesburgu i dwa w dwóch różnych placówkach w Pradze (dwuletni na Uniwersytecie Karola oraz jednoroczny w Instytucie Fizyki Czeskiej Akademii Nauk). Podczas każdego z nich wykazał się znaczącą aktywnością naukową, udokumentowaną publikacjami. Pracując na obu Uniwersytetach, Habilitant miał również okazję wykazać się aktywnością dydaktyczną i popularyzatorską. Tym samym jego aktywność naukowa spełnia trzeci z warunków nadania stopnia doktora habilitowanego, stawianych w art. 219 ust. 1 Ustawy (pkt 3).

Podsumowanie

Habilitant jest doświadczonym fizykiem, specjalistą w zakresie badań szeroko pojętych własności transportowych i termodynamicznych, ze szczególnym u uwzględnieniem zjawisk termoelektrycznych i transportu ciepła w układach Kondo i tych z mieszaną/pośrednią wartościowością. Samodzielnie przygotował próbki badanych materiałów i wykazał się dobrym warsztatem eksperymentatora. Do interpretacji otrzymanych wyników używał szeregu modeli teoretycznych. Jego Osiągnięcie stanowi znaczny wkład w rozwój dyscypliny.

Oznacza to, że dr Michał Falkowski jest dobrze przygotowany do samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a jego dorobek naukowy i przejawy innych form aktywności naukowej spełniają wszystkie warunki stawiane przez Ustawę kandydatom ubiegającym się o stopień naukowy doktora habilitowanego. Na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie Pana dra Michała Falkowskiego do dalszego etapu postępowania habilitacyjnego.

Wrocław, 12 kwietnia 2021



Piotr Wiśniewski
dr hab. prof. INTiBS PAN