Autoreferat

1. Imię i nazwisko: Adam Piotr Pikul

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:

   - **doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki – 2003**, Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu, tytuł rozprawy doktorskiej: „Silne korelacje elektronowe w wybranych międzymetalicznych związkach ceru", promotor: prof. dr hab. Dariusz Kaczorowski,

   - **magister fizyki – 1999**, Wydział Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego, kierunek: fizyka doświadczalna, tytuł pracy magisterskiej: „Obserwacja chemisorpcji wodoru na powierzchni krzemu za pomocą skaningowego mikroskopu tunelowego", promotor: dr hab. prof. Jerzy J. Czyżewski.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

   - **od 2004 – adiunkt** w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu;

   - **2003–2004 – asystent** w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu.

Pikul

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a. Tytuł osiągnięcia naukowego.

„Zbadanie wpływu modyfikacji składu chemicznego na stan podstawowy wybranych układów f-elektronowych"

b. (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa).

H1. **A. P. Pikul**, N. Caroca–Canales, M. Deppe, P. Gegenwart, J. G. Sereni, C. Geibel, F. Steglich, „Non-Fermi-liquid behaviour close to the disappearance of ferromagnetism in $CePd_{1-x}Rh_x$", Journal of Physics: Condensed Matter 18 (2006) L535–L542.

H2. **A. P. Pikul**, C. Geibel, N. Oeschler, M. E. Macovei, N. Caroca-Canales, F. Steglich, „Lack of magnetic ordering in $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$", Physica Status Solidi B 247 (2010) 691–693.

H3. **A. P. Pikul**, D. Gnida, „Superconducting phase transition in $YNiGe_3$, a non-f-electron reference to the unconventional superconductor $CeNiGe_3$", Solid State Communications 151 (2011) 778–780.

H4. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, „Kondo effect in the presence of ferromagnetism in $U_{1-x}Th_xNiSi_2$", Journal of the Physical Society of Japan 80 (2011) SA107.

H5. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, „Evolution from a localized to an intermediate valence regime in $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$", Journal of Physics: Condensed Matter 23 (2011) 456002.

H6. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, „Search for quantum criticality in a ferromagnetic system $UNi_{1-x}Co_xSi_2$", Physical Review B 85 (2012) 045113.

H7. **A. P. Pikul**, U. Stockert, A. Steppke, T. Cichorek, S. Hartmann, N. Caroca-Canales, N. Oeschler, M. Brando, C. Geibel, F. Steglich, „Single-ion Kondo scaling of the coherent Fermi liquid regime in $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$", Physical Review Letters 108 (2012) 066405.

H8. **A. P. Pikul**, „The influence of magnetic sublattice dilution on magnetic order in $CeNiGe_3$ and $UNiSi_2$" Journal of Physics: Condensed Matter 24 (2012) 276003.

*Oświadczenia wszystkich współautorów (w tym habilitanta) określające indywidualny wkład każdego z nich w powstanie powyższych publikacji zostały zamieszczone w załączniku nr 4.

Pikul

c. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

I. WSTĘP

Układy f-elektronowe, czyli związki chemiczne oparte na lantanowcach i aktynowcach, mają ogromne znaczenie dla fizyki ciała stałego ze względu na występowanie w nich wielu ważnych zjawisk fizycznych. Obecność elektronów f w strukturze elektronowej tych związków jest czynnikiem wpływającym m.in. na przebieg akcji laserowej w kryształach domieszkowanych ziemiami rzadkimi, własności magnetyczne magnesów neodymowych, czy też występowanie wysokotemperaturowego nadprzewodnictwa w miedzianach. Z punktu widzenia współczesnej fizyki magnetyzmu najistotniejsze wydają się być badania własności fizycznych związków międzymetalicznych, w których to powłoka f jest częściowo zdelokalizowana na skutek hybrydyzacji elektronów f z elektronami s, p i d, tworzącymi pasmo przewodnictwa [1–4]. Zgodnie z diagramem Doniacha [5], magnetyzm układów f-elektronowych jest funkcją całki wymiany, będącej parametrem wyrażającym stopień hybrydyzacji. Modyfikacja wartości całki wymiany, wywołana parametrami zewnętrznymi (np. ciśnieniem hydrostatycznym, polem magnetycznym, czy też zmianą składu chemicznego), może prowadzić do ewolucji stanu podstawowego danego układu, a w konsekwencji jego własności magnetycznych. Odpowiednio kontrolując ten proces można np. przeprowadzić układ uporządkowany magnetycznie poprzez kwantowy punkt krytyczny do stanu nieuporządkowanego lub wręcz niemagnetycznego [6,7].

Niniejsza rozprawa dotyczy wpływu modyfikacji składu chemicznego na stan podstawowy wybranych związków międzymetalicznych na bazie ceru i uranu. W zależności od zakładanego charakteru zmian i bezpośrednich skutków tej modyfikacji, można wyróżnić trzy metody eksperymentalne: ciśnienie chemiczne, rozcieńczanie magnetyczne oraz domieszkowanie elektronami. Przez **ciśnienie chemiczne** rozumie się wymuszenie zmiany objętości komórki elementarnej danego związku poprzez częściowe, izostrukturalne podstawienie jednego z jego pierwiastków składowych pierwiastkiem o bardzo podobnych własnościach chemicznych i konfiguracji elektronowej, lecz nieco innym promieniu atomowym. Jeśli uzyskana w ten sposób zmiana parametrów sieciowych jest monotoniczna i wykazuje tę samą tendencję (tzn. spadek lub wzrost) w każdym z trzech głównych kierunków krystalograficznych, ciśnienie chemiczne można uznać za równoważne dodatniemu lub ujemnemu ciśnieniu hydrostatycznemu. Pamiętać jednak należy, że atomy w próbce są podstawiane w sposób losowy. Dlatego też bezpośrednio modyfikowana jest wielkość tylko niektórych komórek elementarnych, a wyznaczone eksperymentalnie parametry sieciowe próbki są wielkościami uśrednionymi.

Rozcieńczanie magnetyczne to z kolei częściowe, izostrukturalne zastępowanie atomów obdarzonych niezerowym wypadkowym momentem magnetycznym atomami z zerowym momentem. W przypadku układów będących przedmiotem badań habilitanta jest to zamiana atomów z częściowo zapełnioną powłoką elektronową f na atomy z pustą lub całkowicie wypełnioną powłoką f. Tak zdefiniowane rozcieńczanie magnetyczne powoduje zwiększenie średniej odległości pomiędzy pozostającymi w sieci krystalicznej momentami magnetycznymi, a co za tym idzie – osłabienie bezpośrednich i pośrednich oddziaływań wymiennych. Prowadzi to zwykle do obniżenia temperatury uporządkowania magnetycznego oraz do zmiany jego charakteru.

Pikul

W przypadku, kiedy celem eksperymentu jest zmiana struktury elektronowej niemagnetycznego otoczenia momentów magnetycznych, stosuje się **domieszkowanie elektronami**, dobrze znane m.in. w fizyce półprzewodników. W układach f-elektronowych pojęcie to jest znacznie szersze i obejmuje również roztwory stałe. Zmieniana jest w nich ilość elektronów s, p i d przy zachowanej wielkość komórki elementarnej oraz ilości elektronów f.

W praktyce niemożliwe jest zupełne rozdzielenie trzech wymienionych metod eksperymentalnych (tj. ciśnienia chemicznego, rozcieńczania magnetycznego i domieszkowania elektronami), gdyż zastąpienie w strukturze krystalicznej jednego pierwiastka innym zawsze pociąga za sobą pewną zmianę parametrów sieci i struktury elektronowej związku. Dlatego też wpływ modyfikacji składu chemicznego na stan podstawowy konkretnego układu nie zawsze jest zgodny z oczekiwaniami, a założony bezpośredni skutek tej modyfikacji (np. powiększenie komórki elementarnej) niekoniecznie jest czynnikiem decydującym o ewolucji własności fizycznych.

II. CEL NAUKOWY

Celem naukowym prac składających się na rozprawę habilitacyjną było **zbadanie wpływu modyfikacji składu chemicznego na stan podstawowy związków CePd i CeRh, $UNiSi_2$ i $UCoSi_2$, Ce_2Cu_2In i Ce_2Ni_2In, $CeNi_2Ge_2$, oraz $CeNiGe_3$**. Dobór związków był podyktowany przede wszystkim ich ciekawymi własnościami fizycznymi (opisanymi szczegółowo w dalszej części autoreferatu) oraz faktem istnienia zbliżonych składem izostrukturalnych odpowiedników, koniecznych do zastosowania ciśnienia chemicznego, rozcieńczania magnetycznego i domieszkowania elektronami. Ze względu na charakter oczekiwanych zmian można wyodrębnić trzy cele szczegółowe:

a. przeprowadzenie uporządkowanych magnetycznie układów CePd, $UNiSi_2$ i Ce_2Cu_2In do stanu fluktuującej wartościowości lub fluktuacji spinowych w związkach CeRh, $UCoSi_2$ i Ce_2Ni_2In,
b. wymuszenie zaniku uporządkowania magnetycznego w układach $CeNiGe_3$ i $UNiSi_2$ poprzez ich rozcieńczanie niemagnetycznymi odpowiednikami $YNiGe_3$ i $ThNiSi_2$,
c. wywołanie uporządkowania magnetycznego dalekiego zasięgu w $CeNi_2Ge_2$ poprzez częściowe podstawienie atomów ceru większymi atomami lantanu.

Wyznaczając powyższe cele zakładano, że dzięki modyfikacji składu chemicznego możliwe będzie uzyskanie dodatkowych informacji na temat stanów podstawowych badanych związków, których otrzymanie w inny sposób byłoby znacznie trudniejsze lub wręcz niemożliwe. W szczególności dotyczy to np. określenia pozycji danego układu względem ewentualnego kwantowego punktu krytycznego, weryfikacji hipotezy o oddziaływaniu elektronów f z polem krystalicznym, czy też zbadania charakteru oddziaływań Kondo (koherentnego lub lokalnego).

Pikul

III. Osiągnięte wyniki

a. *Ciecz nie-Fermionowska i rozkład temperatur Kondo w $CePd_{1-x}Rh_x$* **[H1]**.

Kwantowe przejście fazowe występuje w temperaturze zera bezwzględnego i jest kontrolowane przez fluktuacje kwantowe, a nie klasyczne, jak to ma miejsce w skończonych temperaturach. Jeśli przejście to ma charakter ciągły (jest przejściem drugiego rodzaju), mówi się o kwantowym punkcie krytycznym. Unikalne własności fizyczne układów f-elektronowych w pobliżu kwantowego punktu krytycznego (m.in. rozbieżny do nieskończoności współczynnik elektronowego ciepła właściwego, liniowy opór elektryczny, czy też rozbieżny do nieskończoności współczynnik Grüneisena [8,9]) są jednym z głównych przedmiotów badań współczesnej fizyki ciała stałego [1].

Większość z przeprowadzonych dotąd badań doświadczalnych kwantowego punktu krytycznego (niezależnie od rozważanych scenariuszy teoretycznych) była poświęcona licznym niestechiometrycznym stopom i stechiometrycznym związkom opartym na cerze, iterbie lub uranie, które wykazują korelacje antyferromagnetyczne [6,7]. Ferromagnetyczne punkty krytyczne są znacznie słabiej poznane zarówno z teoretycznego, jak i doświadczalnego punktu widzenia [6,7,10]. Dlatego też, szczególnie ważne jest badanie związków, w których ferromagnetyzm może być zdławiony do temperatury zera bezwzględnego przez parametry zewnętrzne, takie jak: ciśnienie, pole magnetyczne, czy skład chemiczny.

Roztwory stałe $CePd_{1-x}Rh_x$ są przykładem układu, który świetnie nadaje się do badania kwantowej krytyczności w ferromagnetykach. Wykazuje on bowiem ciągłe przejście ze stanu uporządkowania ferromagnetycznego dalekiego zasięgu z temperaturą Curie T_C = 6,6 K w CePd do stanu fluktuującej wartościowości w izostrukturalnym CeRh [11]. Przez częściowe podstawienie palladu rodem można obniżyć temperaturę Curie tego układu do 250 mK w $CePd_{0,20}Rh_{0,80}$ [12]. Jak pokazały pomiary ciepła właściwego przeprowadzone do 450 mK [13], f-elektronowy wkład $\Delta C/T$ do ciepła właściwego stopów $CePd_{1-x}Rh_x$ wykazuje obniżanie się ze wzrostem x, co jest zgodne z zaobserwowanym (i oczekiwanym) wzrostem temperatury Kondo układu w związku z jego przesuwaniem się w stronę stanu fluktuującej wartościowości. Dokładniejsza analiza $\Delta C(T)/T$ wskazała na występowanie stanu cieczy nie-Fermionowskiej co najmniej do 450 mK. Przy czym, o ile w związkach z x = 0,8 i 0,85 zaobserwowano zależność $\Delta C/T \sim -\log T$, o tyle w związkach z x = 0,87, 0,90 i 0,95 widoczna jest słaba zależność potęgowa $\Delta C/T \sim T^{-\alpha}$ z $\alpha \approx 0{,}5$ [13]. Jednocześnie pomiary podatności zmiennoprądowej przeprowadzone poniżej 450 mK pokazały obecność anomalii w temperaturach około 250 mK (x = 0,80) i 130 mK (x = 0,85).

Artykuł H1 opisuje wyniki pomiarów ciepła właściwego roztworów polikrystalicznych $CePd_{1-x}Rh_x$ z x = 0,80, 0,85, 0,87 i 0,90 przeprowadzonych przez habilitanta w temperaturach do 80 mK i w polach magnetycznych do 3 T w celu zweryfikowania hipotezy o formowaniu się cieczy nie-Fermionowskiej oraz określenia jej źródła. Badania te potwierdziły, że układ $CePd_{1-x}Rh_x$ wykazuje cechy cieczy nie-Fermionowskiej w zakresie $x \geq 0{,}85$. W szczególności pokazano, że w związku $CePd_{0,15}Rh_{0,85}$ elektronowy współczynnik ciepła właściwego rośnie logarytmicznie wraz ze spadkiem temperatury przez ponad dwie dekady temperatur, co mogłoby świadczyć o kwantowokrytycznym charakterze cieczy nie-Fermionowskiej. Scenariusz ten został jednak odrzucony ze względu na wykrytą wcześniej w około 130 mK

Pikul

anomalię w temperaturowej zależności zmiennoprądowej podatności magnetycznej tej samej próbki [13]. Anomalia ta, jako będąca bardzo czułą na zmiany częstotliwości wzbudzającego pola magnetycznego, została przypisana formowaniu się szkła spinowego. Taki scenariusz jest zgodny z diagramem fazowym układu, pokazującym charakterystyczną dla oddziaływań bliskiego zasięgu zmianę krzywizny $T_C(x)$ dla dużych wartości x [13]. Argumentem przeciw kwantowokrytycznemu charakterowi cieczy nie-Fermionowskiej jest również zbyt mały przyrost entropii magnetycznej próbki w obszarze $\Delta C/T \sim -\log T$, osiągający mniej niż połowę wartości obserwowanej w typowych związkach niestabilnych magnetycznie. Istnieniu kwantowego punktu krytycznego w $CePd_{0,15}Rh_{0,85}$ przeczy w końcu zachowanie próbek z $x > 0,85$, wykazujących zależność potęgową elektronowego współczynnika ciepła właściwego od temperatury typu $\Delta C/T \sim T^{-\alpha}$ z $\alpha < 1$. Uznano więc, że najbardziej prawdopodobną przyczyną pojawiania się cech cieczy nie-Fermionowskiej w $CePd_{1-x}Rh_x$ jest nieporządek strukturalny na pozycjach palladu i rodu.

W oparciu o zaobserwowaną koincydencję zmian entropii magnetycznej oraz podatności magnetycznej, malejący ze wzrostem x paramagnetyczny wkład do podatności magnetycznej w najniższych temperaturach [13] przypisano niezaekranowanym momentom ceru w $CePd_{1-x}Rh_x$ oraz oszacowano ich koncentrację jako malejącą z około 20% w $CePd_{0,20}Rh_{0,80}$ do kilku % w $CePd_{0,05}Rh_{0,95}$. Niezaekranowane momenty magnetyczne wskazują jednoznacznie na niską (lokalną) temperaturę Kondo T_K (rzędu 1 K lub mniejszą), podczas gdy (średnią) wartość T_K oszacowano z entropii magnetycznej jako będącą na poziomie 50 K. Wywnioskowano stąd, że w układzie $CePd_{1-x}Rh_x$ występuje pewien rozkład temperatur Kondo, będący funkcją nieporządku strukturalnego (zmiennej lokalnej koncentracji rodu). Powołując się na przewidywania teoretyczne [14,15], uznano, że rozkład ten jest źródłem cech typowych dla cieczy nie-Fermionowskiej. Ponadto w naturalny sposób wyjaśnia on pojawienie się uporządkowania bliskiego zasięgu w próbkach $CePd_{0,20}Rh_{0,80}$ i $CePd_{0,15}Rh_{0,85}$.

b. Ewolucja $UNi_{1-x}Co_xSi_2$ w stronę kwantowego punktu krytycznego. **[H6]**

Wśród nielicznych przykładów roztworów, w których ferromagnetyzm może być zduszony przez modyfikację składu chemicznego, można wymienić m.in. $U_{1-x}Th_xCuSi_2$ [16], Ni_xPd_{1-x} [17], $CePd_{1-x}Ni_x$ [18], $CePd_{1-x}Rh_x$ [13], $URu_{2-x}Re_xSi_2$ [19], $URh_{1-x}Ru_xGe$ [20], czy też $UCoGe_{1-x}Si_x$ [21]. Liczba związków stechiometrycznych, dla których zademonstrowano obecność ferromagnetycznego punktu krytycznego, jest niezwykle mała – najbardziej znanymi przykładami są UGe_2 [22], URhGe [23] i UCoGe [24]. Znaczące jest, że jak dotąd jedynym stechiometrycznym ferromagnetykiem, w którym postuluje się obecność kwantowego przejścia fazowego drugiego rodzaju, wydaje się być CePt [25].

Potrójne krzemki uranu $UTSi_2$ (T = Fe, Co, Ni), krystalizujące w strukturze rombowej typu $CeNiSi_2$, są znane jako wykazujące różnorodne własności magnetyczne wynikające z hybrydyzacji elektronów 5f uranu z elektronami 3d metali przejściowych. Podczas gdy $UNiSi_2$ jest uporządkowaną ferromagnetycznie (T_C = 95 K) siecią Kondo ze względnie dobrze zlokalizowanymi elektronami 5f [26–28], $UCoSi_2$ zachowuje się jak układ z fluktuacjami spinowymi, a niestechiometryczny $UFe_{1-y}Si_2$ wykazuje cechy paramagnetyku Pauliego [26].

Praca H6 przedstawia wyniki podjętych w oparciu o powyższe doniesienia badań polikrystalicznych roztworów stałych $UNi_{1-x}Co_xSi_2$ ($0 \leq x \leq 1$) z naciskiem położonym na składy leżące w pobliżu ferromagnetycznej niestabilności, której pojawienia się można było

Pikul

oczekiwać przy pewnym krytycznym stężeniu kobaltu x_c. Pomiary rentgenowskiej dyfrakcji proszkowej pokazały, że częściowe podstawianie niklu kobaltem stopniowo skraca krawędzie *a* i *c* komórki elementarnej, a wydłuża krawędź *b*. W sumie objętości komórki elementarnej ulega jednak liniowemu zmniejszaniu ze wzrostem *x*, osiągając przy pełnym podstawieniu zmianę na poziomie zaledwie 1,2%. Analiza odwrotności podatności magnetycznej w obszarze nieuporządkowanym wykazała, że moment efektywny uranu nie zmienia się w całym zakresie stężeń, choć jego wartość oszacowaną z dopasowania prawa Curie–Weissa (tj. 2,3 μ_B) należy traktować z dużą rezerwą ze względu na powszechną w związkach uranu częściową delokalizację powłoki 5f, silne pole krystaliczne oraz silne sprzężenie spinowo-orbitalne. Wyznaczona w ten sam sposób temperatura paramagnetyczna Curie maleje monotonicznie z około 95 K w $UNiSi_2$ do około –70 K w $UCoSi_2$, zmieniając znak przy dużych (powyżej 90%) stężeniach kobaltu, co może (ale nie musi) świadczyć o zmianie charakteru oddziaływań z ferromagnetycznego na antyferromagnetyczny. Co najważniejsze, pod wpływem zwiększania ilości kobaltu w roztworach maleje także temperatura uporządkowania ferromagnetycznego T_C z 95 K w $UNiSi_2$ do około 8,6 K w $UNi_{0,04}Co_{0,96}Si_2$, a wraz z nią również wielkość namagnesowania. W próbkach powyżej 96% kobaltu Brillouin'owska anomalia widoczna w temperaturowej zależności namagnesowania w T_C przeistacza się w szerokie maksimum o nieznanym pochodzeniu, które w $UCoSi_2$ zupełnie zanika. Jednocześnie pomiary namagnesowania jako funkcji pola magnetycznego wykazały, że nawet w próbce z 98% kobaltu ciągle widoczny jest słaby wkład ferromagnetyczny. Pomiary oporu elektrycznego i ciepła właściwego potwierdziły obniżanie się temperatury uporządkowania ferromagnetycznego dalekiego zasięgu wraz ze wzrostem *x*. Temperaturowe zależności oporu elektrycznego pokazały ponadto, że w próbkach z $x \geq 0,80$ fluktuacje spinowe zaczynają dominować nad efektem Kondo.

Uzyskane wyniki pozwoliły na skonstruowanie magnetycznego diagramu fazowego, zgodnie z którym uporządkowanie ferromagnetyczne wydaje się zanikać całkowicie dopiero przy $x_c \rightarrow 1$, czyli w stechiometrycznym $UCoSi_2$, co czyni ten związek idealnym kandydatem do badania ferromagnetycznego punktu krytycznego. W tym kontekście szczególnie pilnym jest dokładne zbadanie charakteru oddziaływań magnetycznych w próbkach z $0,96 < x < 1$.

c. *Zanik uporządkowania dalekiego zasięgu w $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i $U_{1-x}Th_xNiSi_2$.* **[H4 i H8]**

Badania własności fizycznych rozcieńczanego itrem $CeNiGe_3$ i rozcieńczanego torem $UNiSi_2$ zostały przeprowadzone w celu zbadania możliwości osiągnięcia w nich stanu niestabilności magnetycznej za pomocą rozcieńczania magnetycznego. Pierwszy z nich porządkuje się antyferromagnetycznie poniżej temperatury Néela $T_N = 5,5$ K i wykazuje cechy gęstego układu Kondo z temperaturą Kondo T_K bliską T_N [29]. Pomiary własności fizycznych przeprowadzone pod ciśnieniem hydrostatycznym wykazały początkowy wzrost T_N do około 8 K przy ciśnieniu 3 GPa. Zastosowanie wyższych ciśnień powoduje gwałtowny spadek temperatury Néela i zanik uporządkowania antyferromagnetycznego przy około 5.5 GPa. Jednocześnie, wraz z rosnącym ciśnieniem, elektrony 4f stają się częściowo zdelokalizowane, aż w końcu przy około 8 GPa związek wykazuje cechy układu z mieszaną wartościowością [30,31]. Własności $UNiSi_2$ zostały opisane wyżej.

Prace H4 i H8 przedstawiają wyniki badań własności fizycznych polikrystalicznych roztworów stałych $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i $U_{1-x}Th_xNiSi_2$ ($0 \leq x \leq 1$). Analiza rentgenowskich dyfraktogramów proszkowych potwierdziła, że częściowa zamiana ceru przez mniejszy itr

Pikul

oraz uranu przez większy tor nie zmienia struktury krystalicznej badanych układów, a tylko powoduje liniowe (ze wzrostem x) zmiany ich parametrów sieciowych. Na podstawie pomiarów własności magnetycznych obu serii roztworów stwierdzono, że ani zmniejszenie objętości komórki elementarnej $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ (w sumie o około 6%) ani zwiększenie tej objętości w $U_{1-x}Th_xNiSi_2$ (o około 7%) nie zmienia wielkości efektywnego momentu magnetycznego ceru i uranu. Rozcieńczanie podsieci magnetycznej ceru i uranu niemagnetycznym itrem i torem prowadzi natomiast do wyraźnego obniżenia temperatury uporządkowania magnetycznego w obu układach z T_N = 5,5 K w $CeNiGe_3$ i T_C = 95 K w $UNiSi_2$ do 1,35 K w $Ce_{0,4}Y_{0,6}NiGe_3$ i 29 K w $U_{0,3}Th_{0,7}NiSi_2$. Jednocześnie wyraźne anomalie widoczne w temperaturowych zależnościach podatności magnetycznej, namagnesowania, ciepła właściwego i entropii magnetycznej w $T_{N,C}$ stopniowo rozmywają się ze wzrostem x.

Na podstawie uzyskanych danych doświadczalnych skonstruowano wstępne magnetyczne diagramy fazowe układów $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i $U_{1-x}Th_xNiSi_2$. Pokazują one, że zachowanie obu układów jest podobne do zachowania rozcieńczonych stopów magnetycznych [32]. W szczególności, w bogatej w cer i uran części diagramów wyróżnić można obszar uporządkowania magnetycznego dalekiego zasięgu, z następującym po nim w części rozcieńczonej charakterystycznym, wolno zanikającym obszarem uporządkowania bliskiego zasięgu. Te dwa zakresy stężeń są rozgraniczone między sobą krytycznym stężeniem x_c, oszacowanym zgrubnie przez ekstrapolację początkowej krzywizny $T_{N,C}(x)$ do temperatury zera bezwzględnego na około 0,64 w $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i 0,75 w $U_{1-x}Th_xNiSi_2$.

Dalekozasięgowy charakter porządku magnetycznego próbek $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i $U_{1-x}Th_xNiSi_2$ z $x = 0,0$ i 0,2 został wydedukowany m.in. z obecności wyraźnych anomalii w temperaturowych zależnościach entropii magnetycznej $\Delta S(T)$. Ponieważ kształt krzywej $\Delta S(T)$ mocno zależy od struktury magnetycznej i procesów termicznego rozmagnesowania, proste struktury magnetyczne z wysoką anizotropią są przyczyną ostrego wzrostu entropii i wyraźnego załamania w temperaturze uporządkowania [33]. Wzrastający z x stopień nieporządku strukturalnego (wprowadzonego przez rozcieńczanie) powoduje natomiast rozmycie anomalii w $T_{N,C}$. W końcu dla dużych wartości x trudno dopatrzeć się jakiejkolwiek anomalii na krzywej $\Delta S(T)$, mimo że niewielkie anomalie są ciągle widoczne na innych zmierzonych charakterystykach fizycznych. Ten ostatni fakt, razem ze zmianą krzywizny $T_{N,C}(x)$ w x_c, sugeruje dominację oddziaływań bliskiego zasięgu w próbkach z $x > x_c$.

Zaobserwowana ewolucja własności magnetycznych $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i $U_{1-x}Th_xNiSi_2$ została jakościowo wyjaśniona jako wynikająca z natury oddziaływań wymiennych Rudermana-Kittla-Kasuji-Yosidy, które są odpowiedzialne za pojawianie się porządku magnetycznego w metalach. Ponieważ oddziaływania te są funkcją odległości pomiędzy zlokalizowanymi momentami magnetycznymi, losowe obsadzenie pozycji sieciowych lantanowców i aktynowców przez elektrony f prowadzi najprawdopodobniej do pojawiania się w najbardziej rozcieńczonych roztworach klastrów magnetycznych o różnych rozmiarach i różnych temperaturach uporządkowania [32]. W rezultacie anomalie obserwowane w zbadanych własnościach fizycznych stają się ze wzrostem x coraz bardziej rozmazane, a $T_{N,C}$ reprezentuje średnią temperaturę uporządkowania poszczególnych roztworów. Ponieważ rozmiar klastrów pozostaje skończony daleko poniżej progu perkolacji, na diagramie fazowym widoczny jest charakterystyczny, wolno zanikający obszar uporządkowania bliskiego zasięgu. Powyższa hipoteza wymaga oczywiście potwierdzenia

Pikul

dalszymi eksperymentami, np. pomiarami podatności zmiennoprądowej i rozpraszaniem neutronów.

d. Nadprzewodnictwo w $YNiGe_3$. **[H3]**

Praca H3 przedstawia wyniki pomiarów oporu elektrycznego i ciepła właściwego niemagnetycznego $YNiGe_3$, przeprowadzonych w ramach badań roztworów $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ (opisanych wyżej) w celu określenia wkładu fononowego do ich całkowitego ciepła właściwego oraz oporu elektrycznego. Niespodziewanie związek $YNiGe_3$ okazał się przechodzić w stan nadprzewodzący pod ciśnieniem normalnym poniżej temperatury $T_c \approx$ 460 mK. Objętościowy charakter nadprzewodnictwa potwierdza nie tylko gwałtowny spadek oporu elektrycznego do zera, ale również obecność wyraźnej anomalii w temperaturowej zależności ciepła właściwego. Wyniki pomiarów wykonanych w polach magnetycznych wykazały konwencjonalny charakter nadprzewodnictwa w $YNiGe_3$. Powyższy wynik jest o tyle ciekawy, że w podobnej temperaturze (tj. 480 mK) i pod ciśnieniem 5,5 GPa nadprzewodnictwo wykazuje również związek $CeNiGe_3$. W tym ostatnim związku ma ono jednak niekonwencjonalny charakter wynikający z obecności elektronów 4f ceru [34].

e. Odwrócenie konfiguracji elektronowej w $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ **[H5]**.

Mimo że Ce_2Cu_2In i Ce_2Ni_2In krystalizują w tej samej, tetragonalnej strukturze typu Mo_2FeB_2, a swobodne atomy miedzi i niklu posiadają niemal identyczną konfigurację elektronową i promień atomowy, stany podstawowe tych dwóch związków są diametralnie różne [37]. Własności fizyczne pierwszego z nich wskazują na dobrze zlokalizowany magnetyzm związany z obecnością stabilnych magnetycznie jonów Ce^{3+}. Związek porządkuje się antyferromagnetycznie w temperaturze Néela T_N = 5,5 K, a jego własności transportowe są zdominowane przez rozpraszanie Kondo w obecności silnego pola krystalicznego. Drugi związek wykazuje natomiast wyraźne cechy układu z fluktuującą wartościowością [37,38]. Ponieważ obydwa związki są izostrukturalne, różnica pomiędzy ich stanami podstawowymi wynika wyłącznie z zamiany miedzi na nikiel. Stąd badania roztworów stałych $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ są unikalną okazją do prześledzenia ewolucji układu f-elektronowego od pełnej lokalizacji momentów magnetycznych do stanu fluktuującej wartościowości, przewidzianej przez diagram Doniacha [5]. Warto zaznaczyć, że systematyczne zbadanie takiej ewolucji jest często trudne (lub nawet niemożliwe) z powodu zbyt małej różnicy pomiędzy stanami podstawowymi związków macierzystych lub też z powodu zmieniającej się struktury krystalicznej roztworów. W związku z tym badania tego typu pokrywają zwykle tylko część diagramu Doniacha, np. obszar w pobliżu kwantowego punktu krytycznego.

W pracy H5 przedstawiono i przeanalizowano wyniki pomiarów dyfrakcji promieni rentgenowskich, podatności magnetycznej i oporu elektrycznego przeprowadzonych dla serii polikrystalicznych roztworów stałych $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ ($0 \leq x \leq 1$). Pomiary te wykazały, że częściowe podstawienie miedzi niklem w uporządkowanym antyferromagnetycznie związku Ce_2Cu_2In prowadzi do prawie liniowego zmniejszenia jego objętości komórki elementarnej (w sumie aż o około 10%), któremu towarzyszy drastyczna zmiana własności fizycznych układu. Pomiary podatności magnetycznej roztworów $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ jako funkcji temperatury wykazały ciągłą ewolucję układu z reżimu zlokalizowanego dla $x \leq 0{,}6$ do stanu fluktuującej wartościowości dla $x \geq 1{,}6$. Szczegółowa analiza odwrotności podatności magnetycznej

Pilul

w ramach modelu fluktuacji międzykonfiguracyjnych [39] pokazała odwrócenie kolejności poziomów energetycznych $4f^1$ i $4f^0$ w stopach z $0,6 \leq x \leq 1,6$. Innymi słowy: poziom $4f^1$, będący stanem podstawowym w roztworach bogatych w cer i leżący poniżej poziomu Fermiego (równoważnemu konfiguracji $4f^0$), staje się w roztworach bogatych w nikiel stanem wzbudzonym leżącym powyżej poziomu Fermiego.

Głęboko w stanie zlokalizowanym momenty magnetyczne ceru porządkują się antyferromagnetycznie, a temperatura Néela obniża się liniowo ze wzrostem zawartości niklu z około 5,5 K w Ce_2Cu_2In do 2,7 K w $Ce_2Cu_{1,8}Ni_{0,2}In$. Jednocześnie postępujące poszerzenie maksimum w podatności magnetycznej w T_N wskazuje na możliwe rozmycie przejścia fazowego w temperaturach bliskich zeru bezwzględnemu. Wzrost temperatury paramagnetycznej Curie wraz z rosnącą ilością niklu został przypisany wzrostowi całki wymiany. Analiza temperaturowych zależności oporu elektrycznego bogatych w miedź związków $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ w oparciu o model Cornut'a–Coqblin'a potwierdziła, że przesuwanie się układu z reżimu gęstej sieci Kondo w stronę niemagnetycznego metalu jest kontrolowane głównie przez wzrost wartości całki wymiany.

Obserwowana ewolucja stanu podstawowego w układzie $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ jest zgodna z modelem Doniacha sieci Kondo, który przewiduje zmianę charakteru stanu podstawowego z uporządkowania dalekiego zasięg do stanu mieszanej wartościowości. Przekształcenie to jest wzbudzone wzrostem wartości całki wymiany, która jest miarą siły hybrydyzacji. W $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ wzrost ten jest prawdopodobnie konsekwencją zaobserwowanego zmniejszenia objętości komórki elementarnej. Jednoczesna redukcja liczby elektronów 3d, która prowadziłaby raczej do zmniejszenia wartości całki wymiany, wydaje się mieć znacznie mniejszy wpływ na własności fizyczne układu.

f. Brak uporządkowania magnetycznego oraz lokalne cechy stanu koherentnego w $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$ **[H2 i H7]**.

$CeNi_2Ge_2$ jest dobrze znanym nieuporządkowanym magnetycznie i nienadprzewodzącym (pod ciśnieniem normalnym) układem ciężkofermionowym z temperaturą charakterystyczną Kondo wynoszącą około 30 K [40]. W zakresie temperatur milikelwinowych związek ten wykazuje anomalne temperaturowe zależności elektronowego ciepła właściwego ($\Delta C/T \sim -\sqrt{T}$), magnetycznego wkładu do oporu elektrycznego ($\Delta\rho \sim T^{1,5}$) i współczynnika Grüneisena ($\Gamma \sim 1/T$), będące w idealnej wręcz zgodzie z przewidywaniami teorii trójwymiarowych fluktuacji gęstości spinowej dla antyferromagnetycznego punktu krytycznego [7]. Zewnętrzne pole magnetyczne wygasza fluktuacje krytyczne w $CeNi_2Ge_2$ i przesuwa związek w stronę reżimu koherentnej cieczy Fermiego z $\Delta C/T \sim const.$ oraz $\rho = \rho_0 + AT^2$[7], podczas gdy częściowe podstawienie atomów niklu przez większe o 10% atomy palladu wywołuje w układzie uporządkowanie magnetyczne dalekiego zasięgu [41]. Obydwie zmiany stanu podstawowego są zgodne z ogólnymi własnościami kwantowych punktów krytycznych, przewidzianymi przez diagram Doniacha [5], co jest silnym argumentem przemawiającym za występowaniem niestabilności magnetycznej w tym związku.

W pracy H2 podjęto próbę przeprowadzenia układu $CeNi_2Ge_2$ do stanu uporządkowanego magnetycznie poprzez częściowe zastąpienie atomów ceru większymi o około 2% (pod względem długości promienia atomowego) atomami lantanu. Na podstawie wyników pomiarów rozpraszania promieniowania rentgenowskiego na sproszkowanych

Pilm

próbkach $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$ ($0 \leq x \leq 1$) stwierdzono, że zgodnie z oczekiwaniami struktura krystaliczna układu nie ulega zmianie, a parametry sieciowe oraz objętość komórki elementarnej układu rosną liniowo wraz ze spadkiem stężenia ceru. Analiza własności magnetycznych stopów pokazała, że efektywny moment magnetyczny ceru jest niezależny od stężenia ceru i ma wartość bliską wartości teoretycznej obliczonej dla swobodnego jonu Ce^{3+} (tj. 2,54 μ_B). Innymi słowy, momenty magnetyczne ceru pozostają dobrze zlokalizowane w całym zakresie stężeń. Zgodnie z przewidywaniami modelu Doniacha [5], zwiększenie objętości komórki (a tym samym zmniejszenie wartości całki wymiany) powinno wywołać w układzie kwantowokrytycznym obniżenie temperatury charakterystycznej Kondo oraz doprowadzić do wystąpienia uporządkowania magnetycznego dalekiego zasięgu zlokalizowanych momentów ceru. Tymczasem pomiary ciepła właściwego i podatności magnetycznej przeprowadzone przez habilitanta nie wykazały istnienia uporządkowania magnetycznego dalekiego zasięgu w roztworach $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$ co najmniej do 70 mK, pomimo wyraźnego spadku temperatury Kondo T_K z ok. 30 K (dla x = 0,0) do ok. 2 K (dla x = 0,96). Zamiast tego w próbkach bogatych w cer (x = 0,05 – 0,4) wykryto cechy koherentnej cieczy Fermiego z $\Delta C/T \sim const.$ oraz $\rho = \rho_0 + AT^2$. Ponadto zauważono, że wraz z dalszym obniżaniem stężenia ceru elektronowe ciepło właściwe badanego układu rozbiega się logarytmicznie do nieskończoności, co jest charakterystyczną cechą cieczy nie-Fermionowskiej. W najbardziej rozcieńczonym roztworze (x = 0,96) zaobserwowano własności typowe dla niekoherentnej (lokalnej) cieczy Fermiego, z $\Delta C/T \sim const.$ oraz $\Delta\rho \sim (1 - \alpha T^2)$.

Brak uporządkowania magnetycznego został zinterpretowany jako wynikający z bardzo słabych oddziaływań magnetycznych w $CeNi_2Ge_2$. Hipotezę tę uzasadniono, przytaczając wyniki badań opublikowanych dla rozcieńczanych lantanem związków $CeCu_6$ i $CeRu_2Si_2$. Pierwszy z nich reaguje na stopniową zamianę ceru na lantan tak samo jak $CeNi_2Ge_2$, tzn. momenty magnetyczne ceru pozostają nieuporządkowane w całym zakresie stężeń, a związek stopniowo przechodzi z reżimu koherentnego do lokalnego [42]. Z kolei $CeRu_2Si_2$, *nota bene* krystalizujący w tej samej strukturze co $CeNi_2Ge_2$, wykazuje uporządkowanie antyferromagnetyczne dalekiego zasięgu już dla niewielkich stężeń lantanu (około 7%) [43]. Jak pokazały badania neutronowe, korelacje magnetyczne rozwijają się w $CeCu_6$ w znacznie niższej temperaturze niż w $CeRu_2Si_2$ [44]. Wywnioskowano stąd, że w $CeNi_2Ge_2$ są one co najmniej tak słabe jak w $CeCu_6$.

W pracy H7 przeprowadzono dokładniejszą analizę stanu koherentnego, tak niespodziewanie wykreowanego w stężonych roztworach $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$, oraz zbadano jego ewolucję w stronę lokalnego reżimu Kondo. Odwołując się do modelu poziomu rezonansowego pojedynczej domieszki Kondo, którego jedynym parametrem jest T_K, pokazano, że elektronowe ciepło właściwe $\Delta C/T$ roztworów stężonych (x = 0,05 – 0,4) zmienia się wraz z temperaturą w taki sam sposób, jak w roztworze najbardziej rozcieńczonym (x = 0,99). Tym samym udowodniono, że własności termodynamiczne $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$ w stanie koherentnym i lokalnym są funkcją jednej, zależnej od stężenia ceru temperatury charakterystycznej T_K. Ponadto zauważono, że pomimo tego, że w zakresie cieczy nie-Fermionowskiej ($0,4 < x < 0,99$) ciepło elektronowe $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$ nie daje się opisać modelem rezonansowym, to nadal skaluje się ono z pewną temperaturą charakterystyczną T^*, która zmienia się (maleje) wraz z x w taki sposób, jak T_K w sąsiednich obszarach cieczy Fermionowskiej. Spostrzeżenie to zostało poparte analizą własności transportowych badanych roztworów. W ten sposób udowodniono, że temperatura Kondo

Pikul

układu $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$ maleje w sposób ciągły z około 30 K w $CeNi_2Ge_2$ do około 1,7 K w $Ce_{0,01}La_{0,99}Ni_2Ge_2$. Zmianę tę przypisano rosnącej objętości komórki elementarnej układu, podobnie jak w roztworach $(La_{1-z}Y_z)_{0,85}Ce_{0,15}Al_2$ i $(La_{1-z}Y_z)_{0,94}Ce_{0,06}Al_2$, w których przy ustalonym stężeniu ceru zaobserwowano wzrost T_K o ponad dwa rzędy wielkości przy stopniowym zastępowaniu lantanu znacznie mniejszym itrem.

Zaobserwowane obniżanie się temperatury Kondo związku $CeNi_2Ge_2$ pod wpływem częściowego podstawiania ceru lantanem wydaje się poddawać w wątpliwość podstawowe założenie dwucieczowego opisu sieci Kondo [45], który po raz pierwszy został zaproponowany dla rozcieńczanego lantanem nadprzewodnika ciężkofermionowego $CeCoIn_5$ [46], a później również dla innych związków ciężkofermionowych [47]. W oparciu o prawa skalowania znalezione w roztworach $Ce_{1-x}La_xCoIn_5$ zaproponowano wprowadzenie do opisu sieci Kondo nowej temperatury charakterystycznej T^*, rządzącej oddziaływaniami między powłokami f i zależnej od ich koncentracji w sieci Kondo. Temperatura ta miałaby być wyższa (rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu kelwinów) i niezależna od temperatury Kondo T_K (rzędu 1 K), która to opisywałaby wyłącznie oddziaływanie powłok f z pasmem przewodnictwa i byłaby niezależna od koncentracji domieszek magnetycznych. Pod wpływem rozcieńczania sieci domieszek T^* zbliżałoby się stopniowo do T_K i układ przekształcałby się w układ pojedynczej domieszki Kondo. Wyniki otrzymane dla układu $CeNi_2Ge_2$ w pracy H7 pokazały, że podstawowe założenie modelu dwucieczowego, tzn. niezależność T_K od stężenia ceru, nie jest spełnione w układzie $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$. Ponadto stwierdzono, że dodatkowa skala energetyczna T^* wprowadzona jako parametr skalowania temperaturowych zależności ciepła właściwego jest tożsama z T_K.

IV. PODSUMOWANIE

Omówione powyżej wyniki pokazują dobitnie, że modyfikacja składu chemicznego wybranych układów f-elektronowych istotnie wpływa na ich stan podstawowy i własności magnetyczne, choć przebieg tego procesu w wielu przypadkach jest odmienny od spodziewanego.

Najbardziej nieoczekiwanym wynikiem wydaje się być brak uporządkowania magnetycznego w $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$ [H2], co świadczy o tym, że oddziaływania magnetyczne w związku $CeNi_2Ge_2$ są wyjątkowo słabe. Jednak za najistotniejsze dla fizyki silnych korelacji należy uznać wykazanie, że własności termodynamiczne tego układu dają się opisać zaledwie jednym parametrem, który nosi znamiona temperatury charakterystycznej Kondo [H7]. Odkrycie to jest bowiem bardzo istotne z punktu widzenia weryfikacji zaproponowanego niedawno w literaturze dwucieczowego opisu sieci Kondo.

Zaskakującym i ważnym osiągnięciem jest również wskazanie możliwości występowania ferromagnetycznego kwantowego punktu krytycznego w stechiometrycznym $UCoSi_2$ [H6]. Ponieważ na tym etapie badań nie można wykluczyć, że kwantowy punkt krytyczny w tym związku jest antyferromagnetyczny, albo że osiągany jest on dla składu nieco odbiegającego od idealnej stechiometrii 1:1:2, ostateczne udowodnienie tej hipotezy wymaga przeprowadzenia dodatkowych, niskotemperaturowych pomiarów własności fizycznych na monokryształach tego związku. Badania takie są już prowadzone przez grupę prof. dra hab. Dariusza Kaczorowskiego z INTiBS PAN we Wrocławiu we współpracy z Instytutem Maksa Plancka Fizyki Chemicznej w Dreźnie.

Pikul

Kolejnym nieoczekiwanym i ciekawym wynikiem jest zachowanie układu $CePd_{1-x}Rh_x$ w pobliżu zaniku uporządkowania ferromagnetycznego. Ponieważ podsieć ceru pozostaje nierozcieńczona, należałoby się spodziewać wystąpienia dobrze zdefiniowanego kwantowego punktu krytycznego. Tymczasem cechy cieczy nie-Fermionowskiej obserwuje się w szerokim zakresie koncentracji rodu i są one spowodowane przez rozkład temperatur Kondo. Warto wspomnieć, że powyższy wynik dał początek dalszym badaniom roztworów $CePd_{1-x}Rh_x$, które zakończyły się sformułowaniem hipotezy o szkle klasterów Kondo [Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 206404].

W przeciwieństwie do $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$, $UNi_{1-x}Co_xSi_2$ i $CePd_{1-x}Rh_x$ roztwory $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$, $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i $U_{1-x}Th_xNiSi_2$ nie wykazują (przynajmniej na obecnym etapie badań) zachowań, które można by uznać za zaskakujące. W szczególności $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ wykazuje ciągłą ewolucję ze stanu uporządkowanego do stanu mieszanej wartościowości, a w rozcieńczonych magnetycznie $CeNiGe_3$ i $UNiSi_2$ obserwuje się zanik uporządkowania dalekiego zasięgu poprzez wyraźny obszar uporządkowania bliskiego zasięgu. Niemniej jednak, wyniki badań tych układów również zawierają istotne dla fizyki magnetyzmu nowe elementy. Na uwagę zasługuje zwłaszcza analiza podatności magnetycznej $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$, która wykazała modelowe wręcz przesuwanie się poziomu energetycznego $4f^1$ nad powierzchnię Fermiego. Z kolei nowatorska (choć bardzo prosta) analiza oporu elektrycznego $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$ pokazała wzrost wartości całki wymiany tego układu wraz ze wzrostem stężenia niklu. Roztwory $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$ i $U_{1-x}Th_xNiSi_2$ pokazały natomiast, że ewolucja uporządkowania dalekiego zasięgu w uporządkowanie bliskiego zasięgu rozpoczyna się w tych układach daleko powyżej progu perkolacji.

Na zakończenie warto podkreślić, że dochodzenie do powyższych wniosków wymagało systematycznego zbadania różnymi metodami i w kilku zakresach temperatur bardzo dużej ilości próbek, bowiem na każdy badany układ składało się kilka lub kilkanaście roztworów. I właśnie ze względu na ilość wykonanych eksperymentów w pomiarach własności fizycznych wykorzystano wyłącznie próbki polikrystaliczne, które można uzyskać zdecydowanie łatwiej i szybciej. Ponieważ badania polikryształów wiążą się z pewnymi ograniczeniami, wysoce pożądane jest podjęcie w przyszłości próby uzyskania monokryształów wybranych roztworów i zbadanie m.in. ich anizotropii magnetokrystalicznej i struktury magnetycznej.

LITERATURA CYTOWANA

[1] P. Coleman i A. J. Schofield, Nature 433 (2005) 226.
[2] P. Gegenwart, Q. Si i F. Steglich, Nature Physics 4 (2008) 186.
[3] S. Ernst i in., Nature 474 (2011) 362.
[4] J. Custers i in., Nature Mater. 11 (2012) 189.
[5] S. Doniach, Physica 91B (1977) 231.
[6] G. R. Stewart, Rev. Mod. Phys. 73 (2001) 797; 78 (2006) 743.
[7] P. Gegenwart i in., J. Low Temp. Phys. 133 (2003) 3.
[8] H. von Löhneysen, J. Phys.: Condens. Matter 8 (1996) 9689.
[9] R. Küchler i in., Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 066405.
[10] T. R. Kirkpatrick i D. Belitz, Phys. Rev. B 67 (2003) 024419.
[11] J. G. Sereni, E. Beaurepaire i J. P. Kappler, Phys. Rev. B 48 (1993) 3747.
[12] J. G. Sereni, R. Küchler i C. Geibel, Physica B 359–361 (2005) 41.
[13] J. G. Sereni i in., Phys. Rev. B 75 (2007) 024432.
[14] E. Miranda i V. Dobrosavljevič, Rep. Prog. Phys. 68 (2005) 2337.

Pikul

[15] V. Dobrosavljevič i E. Miranda, Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 187203.
[16] M. Lenkewitz i in., Phys. Rev. B 55 (1997) 6409.
[17] M. Nicklas i in., Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 4268.
[18] J.-P. Kappler i in., Physica B 230–232 (1997) 162.
[19] E. D. Bauer i in., Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 046401.
[20] N. T. Huy i in., Phys. Rev. B 75 (2007) 212405.
[21] D. E. de Nijs, N. T. Huy i A. de Visser, Phys. Rev. B 77 (2008) 140506.
[22] S. S. Saxena i in., Nature 406 (2000) 587.
[23] D. Aoki i in., Nature 413 (2001) 613.
[24] N. T. Huy i in., Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 067006.
[25] J. Larrea J. i in., Phys. Rev. B 72 (2005) 035129.
[26] D. Kaczorowski, Solid State Commun. 99 (1996) 949.
[27] T. Taniguchi i in., J. Magn. Magn. Mater. 177–181 (1998) 55.
[28] A. Das i in., Solid State Commun. 114 (2000) 87.
[29] A. P. Pikul i in., Phys. Rev. B 67 (2003) 224417.
[30] M. Nakashima i in., J. Phys.: Condens. Matter 16 (2004) L255.
[31] H. Kotegawa i in., J. Phys. Soc. Jpn. 75 (2006) 044713.
[32] J. A. Mydosh, „Spin glasses: an experimental introduction" (Taylor & Francis, Londyn-Waszyngton, 1993).
[33] N. Marcano i in., Phys. Rev. B 71 (2005) 134401.
[34] A. Harada i in., J. Magn. Magn. Mater. 310 (2007) 614.
[35] A. Harada i in., Physica B 403 (2008) 1020.
[36] A. Harada i in., J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 103710.
[37] D. Kaczorowski, P. Rogl i K. Hiebl, Phys. Rev. B 54 (1996) 9891.
[38] H. Hauser i in., Physica B 230–232 (1997) 211.
[39] B. B. Sales and D. K. Wohlleben, Phys. Rev. Lett. 18 (1975) 1240.
[40] G. Knopp i in., J. Magn. Magn. Mater. 74 (1988) 341.
[41] G. Knebel i in., Phys. Rev. B 59 (1999) 12390.
[42] Y. Ônuki i T. Komatsubara, J. Magn. Magn. Mater. 63–64 (1987) 281.
[43] S. Quezel i in., J. Magn. Magn. Mater. 76–77 (1988) 403.
[44] J. Rossat–Mignot i in., J. Magn. Magn. Mater. 76–77 (1988) 376.
[45] S. Nakatsuji, D. Pines i Z. Fisk, Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 016401.
[46] S. Nakatsuji i in., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 106402.
[47] Y. Yang i in., Nature 454 (2008) 611.

Pikul

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

I. WYBRANE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE SPOZA TEMATYKI HABILITACYJNEJ

Na tematykę badawczą habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora złożyły się badania w czterech obszarach. Pierwszy, tradycyjny, to poszukiwanie i podstawowa charakteryzacja nowych lub słabo poznanych związków f-elektronowych pod kątem ich własności magnetycznych. Drugi obszar to bardziej wyspecjalizowane badania niskotemperaturowe wybranych związków pod kątem występowania w nich silnych korelacji elektronowych, cech cieczy nie-Femionowskiej, kwantowego punktu krytycznego i niekonwencjonalnego nadprzewodnictwa. Trzecim obszarem były oczywiście badania roztworów stałych, będące podstawą habilitacji, zaś czwarty to okazjonalne badania materiałów egzotycznych z punktu widzenia dotychczasowej tematyki badawczej habilitanta (np. materiałów organicznych, kryształów laserujących i multiferroików).

Ze względu na dużą ilość i różnorodność opublikowanego materiału badawczego poniżej omówione zostały w skrócie tylko niektóre z szerokiego spektrum uzyskanych wyników. **Pełny spis opublikowanych prac zamieszczono w załączniku nr 3.**

a. Lokalizacja momentów magnetycznych ceru w $CePt_4In$.

P1. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, Z. Bukowski, K. Gofryk, U. Burkhardt, Yu. Grin, F. Steglich, „Localization of magnetic moments of cerium in single crystalline $CePt_4In$", Physical Review B 73 (2006) 092406.

P2. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, Z. Bukowski, F. Steglich, „Heat capacity studies of single-crystalline $CePt_4In$", Physica B 403 (2008) 842–843.

Kilka artykułów opublikowanych przez habilitanta tuż po uzyskaniu stopnia doktora było w naturalny sposób poświęconych wynikom uzyskanym w ramach pracy doktorskiej. Wyjątek stanowi wymieniony tutaj związek $CePt_4In$, który był badany również długo po doktoracie z powodu pojawiających się w literaturze kontrowersji co do jego stanu podstawowego. W szczególności wyhodowane zostały monokryształy tego związku, na których przeprowadzono pomiary absorpcji promieniowania rentgenowskiego na krawędzi L_{III} ceru oraz pomiary ciepła właściwego w temperaturach do 70 mK. Wykazały one, że – wbrew doniesieniom innych grup badawczych – momenty magnetyczne ceru są dobrze zlokalizowane i porządkują się magnetycznie w temperaturze ok. 250 mK.

b. Silne pole krystaliczne oraz złożone zachowanie magnetyczne $CeRh_3Si_2$.

P3. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, Z. Gajek, J. Stępień–Damm, A. Ślebarski, M. Werwiński, A. Szajek, „Giant crystal-electric-field effect and complex magnetic behavior in single-crystalline $CeRh_3Si_2$", Physical Review B 81 (2010) 174408.

Pomiary własności fizycznych (głównie ciepła właściwego) monokryształów $CeRh_3Si_2$, uzupełnione pomiarami spektroskopowymi oraz obliczeniami numerycznymi, pozwoliły na wykrycie w tym związku współistnienia wyjątkowo silnego (jak na związki ceru) pola

Pikul

krystalicznego z silnym sprzężeniem spinowo-orbitalnym. W wyniku tego rozszczepiony w polu krystalicznym stan z $j = 5/2$ miesza się z rozszczepionym stanem z $j = 7/2$, a całkowite rozszczepienie multipletu $4f^1$ wynosi aż 5760 K. Ponadto związek charakteryzuje się silną anizotropią magnetokrystaliczną, a jego namagnesowanie zmienia się skokowo pod wpływem pola magnetycznego, tworząc tzw. diabelskie schody.

c. Nadprzewodnictwo niekonwencjonalne i ciecz nie-Fermionowska w Ce_2PdIn_8.

P4. D. Kaczorowski, **A. P. Pikul**, D. Gnida, V. H. Tran,
„Emergence of a superconductivity state from an antiferromagnetic phase in single crystals of the heavy fermion compound Ce_2PdIn_8",
Physical Review Letters 103 (2009) 027003.

P5. D. Kaczorowski, D. Gnida, **A. P. Pikul**, V. H. Tran,
„Heavy-fermion superconductivity in Ce_2PdIn_8",
Solid State Communications 150 (2010) 411–414.

Od roku 1979, kiedy to Steglich ze współpracownikami odkryli nadprzewodnictwo ciężkofermionowe w $CeCu_2Si_2$, znaleziono 39 związków wykazujących istnienie nadprzewodnictwa w obecności momentów magnetycznych, z czego zaledwie 20 przechodzi w stan nadprzewodzący pod ciśnieniem normalnym. Związek Ce_2PdIn_8 jest przykładem związku ciężkofermionowego, który nie tylko przechodzi w stan nadprzewodzący w temperaturze 680 mK, ale również wykazuje wyraźne cechy cieczy nie-Fermionowskiej związanej prawdopodobnie z antyferromagnetycznym kwantowym punktem krytycznym.

O znaczeniu odkrycia grupy prof. dra hab. D. Kaczorowskiego może świadczyć choćby fakt, że dalsze badania prowadzone przez tę grupę zaowocowały kolejnymi znaczącymi publikacjami [Phys. Rev. B 83 (2011) 064504; Phys. Rev. B 84 (2011) 115110; Phys. Rev. X 1 (2011) 011010; Phys. Rev. B 84 (2011) 140507; Phys. Rev. B 85 (2012) 060508].

d. Stan mieszanej wartościowości w związkach $CeRhSi_2$ i $Ce_2Rh_3Si_5$.

P6. D. Kaczorowski, **A. P. Pikul**, U. Burkhardt, M. Schmidt, A. Ślebarski, A. Szajek, M. Werwiński, Yu. Grin,
„Magnetic properties and electronic structures of intermediate valence systems $CeRhSi_2$ and $Ce_2Rh_3Si_5$",
Journal of Physics: Condensed Matter 22 (2010) 215601.

Związki $CeRhSi_2$ i $Ce_2Rh_3Si_5$ były pobieżnie scharakteryzowane w literaturze jako związki z mieszaną wartościowością. Szczegółowe badania ich własności fizycznych oraz przede wszystkim pomiary absorpcji promieniowania rentgenowskiego na krawędzi L_{III} ceru oraz pomiary fotoemisji elektronów z powłok 3d ceru wsparte obliczeniami numerycznymi struktury elektronowej związków pozwoliły na ostateczne potwierdzenie tej hipotezy.

Pikul

e. Szkło klasterów Kondo w roztworach $CePd_{1-x}Rh_x$.

P7. T. Westerkamp, M. Deppe, R. Küchler, M. Brando, C. Geibel, P. Gegenwart, **A. P. Pikul**, F. Steglich,
„Kondo-cluster-glass state near a ferromagnetic quantum phase transition",
Physical Review Letters 102 (2009) 206404.

Dogłębna analiza własności fizycznych roztworów $CePd_{1-x}Rh_x$ zaowocowała postawieniem hipotezy o formowaniu się w tym układzie nieznanego dotąd stanu magnetycznego, nazwanego przez autorów „szkłem klasterów Kondo". Można wyróżnić kilka etapów tego procesu. (1) W podwyższonych temperaturach wszystkie fluktuujące momenty magnetyczne zlokalizowane na jonach ceru są niezaekranowane. (2) Poniżej średniej temperatury Kondo rośnie liczba zaekranowanych momentów f. Jednak ze względu na przypadkowe obsadzenie pozycji palladu rodem oraz silną zależność lokalnej temperatury Kondo od liczby atomów palladu w najbliższym otoczeniu istnieją obszary, w których temperatura Kondo jeszcze nie została osiągnięta. Wewnątrz tych obszarów momenty f są nadal niezaekranowane. (3) Wraz z obniżaniem temperatury te niezaekranowane momenty magnetyczne sprzęgają się ferromagnetycznie i tworzą klastery, przy czym momenty klasterów fluktuują niezależnie. (4) Dalsze chłodzenie układu doprowadza do przypadkowego zamrożenia momentów klasterów w pewnej statycznej konfiguracji.

f. Nowa klasa uniwersalności przemiany antyferromagnetycznej w $YbRh_2Si_2$.

P8. C. Krellner, S. Hartmann, **A. Pikul**, N. Oeschler, J. G. Donath, C. Geibel, F. Steglich, J. Wosnitza,
„Violation of critical universality at the antiferromagnetic phase transition of $YbRh_2Si_2$",
Physical Review Letters 102 (2009) 196402.

Szczegółowa analiza wyników precyzyjnych pomiarów ciepła właściwego monokryształów $YbRh_2Si_2$ o wysokiej jakości (współczynnik oporu resztkowego był na poziomie 150) wykazała, że w badanym układzie wykładnik krytyczny α w pobliżu antyferromagnetycznej przemiany fazowej w temperaturze 72 mK jest równy 0,38. Jest to wartość znacząco różna od wartości obliczonych dla tradycyjnych klas uniwersalności w teorii Ginzburga-Landaua, gdzie $\alpha \leq 0{,}11$. Odkrycie to jest poważnym wyzwaniem dla teorii opisujących magnetyczne przejścia fazowe i ich fluktuacje krytyczne w pobliżu kwantowego punktu krytycznego.

g. Indukowany polem magnetycznym kwantowy punkt krytyczny w YbAgGe.

P9. Y. Tokiwa, **A. Pikul**, P. Gegenwart, F. Steglich, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield,
„Low temperature thermodynamic properties of the heavy fermion compound YbAgGe close to the field-induced quantum critical point"
Physical Review B 73 (2006) 094435.

Związek YbAgGe, jako jeden z nielicznych związków ciężko fermionowych na bazie iterbu wykazuje indukowane polem magnetycznym cechy cieczy nie-Fermionowskiej. Badania jego własności fizycznych w zakresie temperatur do 50 mK i pól magnetycznych do 11,5 T

Pikul

pozwoliły na skonstruowanie magnetycznego diagramu fazowego dla tego związku. Pozwoliło to na wyraźnie rozróżnienie indukowanego polem magnetycznym kwantowego punktu krytycznego w około 4,5 T od nasycania się momentów magnetycznych iterbu w wyższych polach.

h. Silne korelacje elektronowe w $Ce_3Rh_4Si_{13}$.

P10. U. Köhler, **A. Pikul**, N. Oeschler, T. Westerkamp, A. M. Strydom, F. Steglich, „Low-temperature study on the strongly correlated compound $Ce_3Rh_4Si_{13}$", Journal of Physics: Condensed Matter 19 (2007) 386207.

Powodem rozpoczęcia badań związku $Ce_3Rh_4Si_{13}$ była obecność dwóch klatek w jego strukturze krystalicznej: jednej zawierającej cer, a drugiej – cynę, będących potencjalnym źródłem ciekawych zjawisk. Niskotemperaturowe badania własności fizycznych $Ce_3Rh_4Si_{13}$ pokazały, że jego temperatura Kondo wynosi około 2 K, a pierwszy wzbudzony poziom pola krystalicznego leży około 90 K ponad dubletem podstawowym. Ponadto w związku tym pojawia się w temperaturze około 1 K uporządkowanie magnetyczne bliskiego zasięgu.

i. Kwantowy punkt krytyczny w $Ce_3Pd_{20}Si_6$.

P11. A. M. Strydom, **A. Pikul**, S. Paschen, F. Steglich, „Possible field–induced quantum criticality in $Ce_3Pd_{20}Si_6$", Journal of Physics: Conference Series 51 (2006) 239–242.

P12. S. Paschen, M. Müller, J. Custers, M. Kriegisch, G. Hilscher, W. Steiner, **A. Pikul**, F. Steglich, A. Strydom, „Quantum critical behaviour in $Ce_3Pd_{20}Si_6$?" Journal of Magnetism and Magnetic Materials 316 (2007) 90–92.

Wykonane przez habilitanta niskotemperaturowe pomiary ciepła właściwego polikryształów $Ce_3Pd_{20}Si_6$ wykazały, że związek przechodzi dwie następujące po sobie przemiany fazowe, z których pierwsza (w temperaturze około 500 mK) jest stosunkowo mało czuła na pole magnetyczne, a druga (w 310 mK) szybko zanika wraz ze wzrostem pola magnetycznego. Przez analogię do $Ce_3Pd_{20}Ge_6$ przypisano górnej przemianie uporządkowanie kwadrupolowe, a dolnej – antyferromagnetyczne. Niszczenie uporządkowania antyferromagnetycznego polem magnetycznym i towarzyszące mu charakterystyczne zachowania innych własności fizycznych skłoniły autorów do postawienia hipotezy o istnieniu w związku $Ce_3Pd_{20}Si_6$ indukowanego polem antyferromagnetycznego kwantowego punktu krytycznego. Warto dodać, że badania tego układu są nadal kontynuowane. Ostatnio wykryto w nim zachodzącą w niskich temperaturach gwałtowną zmianę powierzchni Fermiego [Nature Mater. 11 (2012) 189], która przypomina tę zaobserwowaną w $YbRh_2Si_2$ i zinterpretowaną jako wynik załamania efektu Kondo [Nature Phys. 5 (2009) 465, Nature 432 (2004) 881].

Pikul

II. STATYSTYKA PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Habilitant jest współautorem **59 artykułów naukowych**, wśród których:

- **54 ukazały się w czasopismach ujętych w bazie „Journal Citation Reports"**, 2 – w czasopiśmie „Journal of Physics: Conference Series", 1 – w czasopiśmie „Solid State Phenomena", a 2 – w wydanych drukiem raportach rocznych zagranicznych instytucji naukowych,
- 51 ukazało się po, a 8 – przed uzyskaniem stopnia doktora,
- 40 to prace regularne, 17 – artykuły pokonferencyjne, a 2 – raporty badawcze,
- 5 ukazało się w czasopiśmie „Physical Review Letters" (w tym 4 listy i 1 odpowiedź na komentarz do listu), 6 – w „Physical Review B", 7 – w „Journal of Physics: Condensed Matter", a pozostałe – w czasopismach o mniejszej randze.

Sumaryczna miara oddziaływania wszystkich publikacji habilitanta wynosi **123,861,** całkowita liczba cytowań wynosi **303** (**264** bez cytowań własnych), a jego współczynnik Hirscha jest równy **10**.

III. KONFERENCJE NAUKOWE

Habilitant jest współautorem ponad 60 komunikatów na międzynarodowych (i jednej krajowej) konferencjach naukowych, przy czym osobiście uczestniczył w ponad 20 konferencjach (średnio w 2–3 rocznie), gdzie **zaprezentował 24 plakaty i wygłosił 3 referaty**. Ponadto **pełnił funkcję sekretarza 1 konferencji międzynarodowej**.

a. Referaty:

3. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski,
„Kondo effect in the presence of ferromagnetism in $U_{1-x}Th_xNiSi_2$",
European Conference „40^{émes} Journées des Actinides" JdA 2010, Genewa, Szwajcaria,

2. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski,
„Silne korelacje elektronowe w $CePt_4In$",
Spotkanie uczestników krajowej sieci naukowej „Nowe materiały dla magnetoelektroniki Mag-El-Mat", 2007, Będlewo koło Poznania,

1. **A. Pikul**, D. Kaczorowski,
„Magnetic and related properties of $U_4Ir_{13}Si_9$ and $U_4Rh_{13}Si_9$",
European Conference „37^{iémes} Journées des Actinides" JdA 2007, Sesimbra, Portugalia.

b. Plakaty:

24. **A. P. Pikul**,
„Effects of Ce substitution by Y in $CeNiGe_3$",
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES 2011, Cambridge, Wielka Brytania,

23. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, P. Rogl,
„Smeared antiferromagnetic phase transition in $Ce_2Cu_{2-x}Ni_xIn$", European Conference "Physics of Magnetism" PM 2011, Poznań,

22. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski
„Kondo effect in the presence of ferromagnetism in $U_{1-x}Th_xNiSi_2$",
International Conference on Heavy Electrons ICHE 2010, Tokio, Japonia,

21. **A. P. Pikul**,
„Alloying studies in $Ce_{1-x}Y_xNiGe_3$",
17th International Conference on Solid Compounds of Transition Elements SCTE 2010, Annecy, Francja,

20. **A. P. Pikul**, C. Geibel, N. Oeschler, M. E. Macovei, N. Caroca-Canales, and F. Steglich,
„Unusual evolution of magnetism in $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$",
Quantum Criticality and Novel Phases QCnP 2009, Drezno, Niemcy,

19. **A. P. Pikul**, Kaczorowski,
„Non-Fermi liquid behaviour in $UCoSi_2$: effect of Th/U substitution in $U_{1-x}Th_xCoSi_2$",
Quantum Criticality and Novel Phases QCnP 2009, Drezno, Niemcy,

18. **A. P. Pikul**, C. Geibel, N. Oeschler, M. E. Macovei, N. Caroca-Canales, F. Steglich,
„Lack of magnetic ordering in $Ce_{1-x}La_xNi_2Ge_2$",
International Conference on Magnetism ICM 2009, Karlsruhe, Niemcy,

17. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski,
„Non-Fermi-liquid behaviour in $UCoSi_2$: effects of U/Th substitution in $U_{1-x}Th_xCoSi_2$",
European Conference „39émes Journées des Actinides" JdA 2009, La Grande–Motte, Francja,

16. **A. P. Pikul**, R. Troć,
„Specific heat studies of unconventional ferromagnetic pressure-induced superconductor UGe_2",
European Conference „39émes Journées des Actinides" JdA 2009, La Grande–Motte, Francja,

15. **A. Pikul**, D. Kaczorowski, M. Pasturel, O. Tougait, H. Noël,
„Transport and thermodynamic properties of $URuSi_3$ and $U_3Ru_2Si_7$",
International Conference on Solid Compounds of Transition Elements SCTE 2008, Drezno, Niemcy,

14. **A. Pikul**, D. Kaczorowski,
„Multi-step magnetic phase transition in CeRh3Si2 studied by means of specific heat measurements",
European Conference „Physics of Magnetism" PM 2008, Poznań,

13. R. Troć, **A. Pikul**,
„High field heat capacity of uranium mononitride UN",
European Conference „38émes Journées des Actinides" JdA 2008, Wrocław,

12. **A. Pikul**, Z. Bukowski, D. Kaczorowski, F. Steglich,
„Heat capacity studies of single-crystalline $CePt_4In$",
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES 2007, Houston, Teksas, USA,

11. **A. Pikul**, T. Westerkamp, R. Küchler, N. Caroca–Canales, M. Deppe, P. Gegenwart, J. Sereni, C. Geibel, F. Steglich,
„Ultra–low–temperature specific heat of $CePd_{1-x}Rh_x$ — smeared ferromagnetic quantum phase transition",
8th Prague Colloquium on f-Electron Systems & General Workshop of the COST Action P16, 2006, Praga, Czechy,

10. **A. Pikul**, T. Westerkamp, R. Küchler, N. Caroca–Canales, M. Deppe, P. Gegenwart, J. Sereni, C. Geibel, F. Steglich,
„Ultra–low–temperature specific heat of $CePd_{1-x}Rh_x$ — smeared ferromagnetic quantum phase transition",
21st General Conference of the European Physical Society Condensed Matter Division, 2006, Drezno, Niemcy,

9. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, Z. Bukowski, K. Gofryk, U. Burkhardt, Yu. Grin, F. Steglich,
„Stable 4f1 configuration of cerium in single–crystalline $CePt_4In$",
Workshop on Anomalous Phenomena in Strongly Correlated Electron Materials, 2005, Wrocław,

8. D. Kaczorowski, **A. P. Pikul**, A. Zygmunt,
„Electrical transport properties of USbSe and USbTe",
European Conference „34émes Journées des Actinides" JdA 2004, Heidelberg, Niemcy,

7. **A. P. Pikul**, Z. Bukowski, J. Stępień–Damm, D. Kaczorowski,
„Single crystal study on a novel Kondo compound $Ce_6Pt_{11}In_{14}$",
International Conference on Magnetism ICM 2003, Rzym, Włochy,

6. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, H. Michor, P. Rogl, A. Czopnik, Yu. Grin, E. Bauer, G. Hilscher,
„Low-temperature specific heat of Ce–Ni–Ge compounds and their nonmagnetic analogues",
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES 2002, Kraków,

5. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, P. Rogl, Yu. Grin,
„Kondo effect in the presence of crystal–field in Ce–Ni–Ge compounds",
European Conference „Physics of Magnetism" PM 2002, Poznań,

4. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, P. Rogl,
„Magnetic, electrical transport and thermal properties of Ce–Ni–Ge compounds",
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES 2001, Ann Arbor, Michigan, USA,

Pikul

3. **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski, V. H. Tran, V. I. Zaremba, F. Steglich,
„Heavy–fermion behavior in $CePt_2In_2$",
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES 2001, Ann Arbor, Michigan, USA,

2. **A. P. Pikul**, A. Czopnik, H. Noël, R. Troć,
„Low–temperature specific heat of some uranium germanides and a new compound $U_6Pt_{18}Ga_{11}$",
European Conference „31^{émes} Journées des Actinides" JdA 2001, Saint–Malo, Francja,

1. R. Troć, **A. P. Pikul**, D. Kaczorowski,
„Effects of U doping in $ThCu_6$",
„30^{iémes} Journées des Actinides" JdA 2000, Drezno, Niemcy,

c. Organizacja:

- **Sekretarz** Europejskiej Konferencji „38^{émes} Journées des Actinides" połączonej z 7 Szkołą Fizyki i Chemii Aktynowców, 2008, Wrocław.

IV. REALIZACJA PROJEKTÓW BADAWCZYCH

Habilitant brał lub bierze udział w realizacji kilku krajowych i międzynarodowych projektów badawczych **(w tym jako kierownik 1 projektu krajowego i jako koordynator 1 projektu międzynarodowego)** oraz uczestniczył w pracach krajowych i europejskich sieci naukowych (jako członek jednej z grup badawczych tworzących sieć).

a. Krajowe projekty badawcze:

- projekt badawczy ogólny NCN nr 2011/01/B/ST3/04443 pt. „Wpływ wzajemnego podstawiania atomów pierwiastków p-elektronowych i d-elektronowych na właściwości elektronowe i magnetyczne wybranych międzymetalicznych związków lantanowców", 2011–2014, **współwykonawca**,

- projekt badawczy własny MNiSW nr N N202 130739 pt. „Termomagnetyczne zjawiska transportowe w układach silnie skorelowanych elektronów", 2010–2013, **współwykonawca**,

- projekt badawczy własny *habilitacyjny* MNiSW nr N N202 10233 pt. „Wpływ ciśnienia chemicznego i rozcieńczania magnetycznego na stan podstawowy wybranych związków f-elektronowych", 2010–2012, **kierownik i wykonawca**,

- projekt badawczy własny MNiSW nr N N202 193234 pt. „Zjawiska krytyczne w punkcie trójkrytycznym Lifszyca w badaniach magnetokalorycznych", 2008–2010, **współwykonawca**,

- projekt badawczy własny MNiSW nr N202 116 32/3270 pt. „Zbadanie mikroskopowych mechanizmów silnych korelacji elektronowych w obszarze

Pikul

niestabilności magnetycznej w wybranych związkach ceru i uranu", 2007–2010, **współwykonawca**,

- projekt badawczy własny *promotorski* KBN nr 2 P03B 028 23 pt. „Silne korelacje elektronowe w wybranych międzymetalicznych związkach ceru", 2002–2004, **wykonawca**,

- projekt badawczy własny KBN nr 2 P03B 150 17 pt. „Silne korelacje elektronowe w potrójnych związkach uranu (kontynuacja)", 1999–2002, **współwykonawca**.

b. Międzynarodowe projekty badawcze:

- projekt badawczy pt. „Badanie układów potrójnych U-Co-Ge i U-Ru-Si: komplementarność nadprzewodnictwa i magnetyzmu" w ramach francusko-polskiego program współpracy CNRS-PAN, 2011–2012, **koordynator**,

- projekt badawczy pt. „Poszukiwanie nowych faz potrójnych w układach U-Co-Ge i U-Ru-Si, które wykazywać mogą zjawisko współistnienia magnetyzmu i nadprzewodnictwa" w ramach polsko-francuskiego programu wymiany osobowej „Polonium", 2009–2010, **współwykonawca**,

- projekt badawczy AUL-125 pt. " Constitution and physical properties of Pu_2PdIn_8 and related Pu-based phases" realizowany w ramach "Actinide User Lab" w Instytucie Pierwiastków Uranowych Zjednoczonego Centrum Komisji Europejskiej Karlsruhe, 2011, **współwykonawca**,

- projekt badawczy pt. „Anomalne własności elektronowe międzymetalicznych związków potrójnych z cerem i iterbem" w ramach polsko-francuskiego programu wymiany osobowej „Polonium", 2007–2008, **współwykonawca**,

- project badawczy pt. „Magnetyzm f-elektronowy i efekty silnych korelacji elektronowych" w ramach polsko-afrykańskiego programu wymiany naukowo badawczej, 2006–2007, **współwykonawca**,

- project badawczy nr 14/2001 pt. „Nowe układy ciężkofermionowe" w ramach polsko-austriackiego programu wymiany naukowo-technicznej, 2001 – 2002, **współwykonawca**,

- project badawczy nr 13/1999 pt. „Nowe materiały o cechach cieczy nie-Fermionowskiej" w ramach polsko-austriackiego programu wymiany naukowo-technicznej, 1999–2000, **współwykonawca**,

- projekt badawczy pt. „Synteza i określenie struktury krystalicznej międzymetalicznych związków ziem rzadkich i uranu" w ramach polsko-ukraińskiego programu wymiany osobowej, 2009–2011, **współwykonawca**.

Pikul

c. Krajowe sieci naukowe:

- sieć naukowa MSSE "Materiały z silnie skorelowanymi elektronami. Otrzymywanie, badania podstawowe i aplikacje.", 2007–2009, **członek grupy badawczej tworzącej sieć**,
- sieć naukowa Mag-El-Mat "Nowe materiały dla magneto elektroniki", 2003–2007, **członek grupy badawczej tworzącej sieć**.

d. Europejskie sieci naukowe:

- sieć naukowa COST P-16 ECOM "Emergent behaviour in correlated matter", 2005–2009, **członek grupy badawczej tworzącej sieć**,
- sieć naukowa ACTINET-6, 2004–2008 "Establishment of a network of excellence for actinide sciences", **członek grupy badawczej tworzącej sieć**.

V. STYPENDIA I WYRÓŻNIENIA

Habilitant otrzymał następujące stypendia i wyróżnienia:

- **2006** – stypendium reintegracyjne niemieckiej Fundacji im. Alexandra von Hubmoldta na realizację autorskiego projektu badawczego w wybranym instytucie naukowym w Polsce,
- **2004 – stypendium naukowe niemieckiej Fundacji im. Aleksandra von Humboldta na realizację autorskiego projektu badawczego w wybranym instytucie naukowym na terenie Niemiec,**
- **2003** – wyróżnienie rozprawy doktorskiej przez Radę Naukową INTiBS PAN we Wrocławiu,
- **2001, 2003** – stypendia konferencyjne Towarzystwa Naukowego Warszawskiego i Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej.

VI. ZAGRANICZNE STAŻE I KRÓTKIE POBYTY BADAWCZE

Habilitant odbył jeden długoterminowy, **podoktorski staż zagraniczny w ramach stypendium niemieckiej Fundacji im. Alexandra von Humboldta**. Oprócz tego wielokrotnie przebywał za granicą w ramach dwustronnej wymiany osobowej oraz biorąc udział w szkołach i warsztatach dla młodych naukowców:

- **2010, 2011** – dwukrotne dwutygodniowe pobyty badawcze na Wydziale Nauk Chemicznych Uniwersytetu Rennes 1 (prof. Olivier Tougait) w ramach realizacji wspólnych projektów badawczych,
- **2011** – dwutygodniowy pobyt badawczy w Instytucie Pierwiastków Transuranowych Zjednoczonego Centrum Komisji Europejskiej (dr Eric Colineau) w ramach realizacji wspólnego projektu badawczego,

Pikul

- **2004 – 2006 – 20-miesięczny staż podoktorski w Instytucie Maksa Plancka Fizyki Chemicznej w Dreźnie w Niemczech (prof. Frank Steglich) w ramach stypendium naukowego niemieckiej Fundacji im. Aleksandra von Humboldta,**

- **2004** – uczestnictwo w 5 Szkole Fizyki i Chemii Aktynowców w Instytucie Pierwiastków Transuranowych Zjednoczonego Centrum Komisji Europejskiej w Karlsruhe w Niemczech,

- **2004** – uczestnictwo w 25 Sesji Wprowadzającej do Rozpraszania Neutronów w Instytucie Hahna–Meitner w Berlinie w Niemczech,

- **2000, 2001, 2004** – kilkukrotne 2–4-tygodniowe pobyty badawcze w Instytucie Chemii Fizycznej Uniwersytetu Wiedeńskiego (prof. Peter Rogl) oraz w Instytucie Fizyki Ciała Stałego Politechniki Wiedeńskiej (prof. Ernst Bauer) w Austrii w ramach realizacji wspólnych projektów badawczych,

- **2000, 2001, 2002, 2004, 2008, 2009** – kilkukrotne 1–4-tygodniowe pobyty badawcze w Instytucie Maksa Plancka Fizyki Chemicznej w Dreźnie w Niemczech (prof. Frank Steglich, prof. Juri Grin) w ramach współpracy dwustronnej instytutów w Dreźnie i we Wrocławiu,

- **2000** – uczestnictwo w 4 Szkole Fizyki i Chemii Aktynowców w Instytucie Maksa Plancka Fizyki Układów Złożonych w Dreźnie w Niemczech.

VII. WSPÓŁPRACA NAUKOWA

Habilitant współpracował lub współpracuje formalnie (w ramach umów pomiędzy instytutami lub realizując wspólne projekty badawcze) lub nieformalnie (przed lub po zakończeniu współpracy formalnej) z pracownikami naukowymi kilkunastu ośrodków krajowych i zagranicznych, czego owocem są wspólne publikacje oraz liczne komunikaty konferencyjne (pominięte w poniższym spisie).

a. Ośrodki krajowe:

- Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie (prof. dr hab. Andrzej Szytuła, dr hab. Michał Rams, 5 wspólnych publikacji),

- Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (dr hab. Łukasz Gondek, 4 wspólne publikacje),

- Instytut Fizyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach (prof. dr hab. Andrzej Ślebarski, 2 wspólne publikacje),

- Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu (dr hab. prof. Andrzej Szajek, 2 wspólne publikacje),

- Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie (dr Mieczysław Borowiec, dr Tatiana Zayarnyuk, 1 wspólna publikacja).

b. Ośrodki zagraniczne:

- Instytut Fizyki Chemicznej Ciał Stałych im. Maksa Plancka w Dreźnie w Niemczech (prof. Frank Steglich, prof. Juri Grin, 17 wspólnych publikacji),
- Wydział Nauk Chemicznych Uniwersytetu w Rennes we Francji (prof. Henri Noël, prof. Olivier Tougait, dr Mathieu Pasturel, 4 wspólne publikacje),
- Instytut Chemii Fizycznej Uniwersytetu Wiedeńskiego w Wiedniu w Austrii (prof. Peter Rogl, 7 wspólnych publikacji),
- Instytut Fizyki Ciała Stałego Politechniki Wiedeńskiej w Wiedniu w Austrii (prof. Ernst Bauer, prof. Herwig Michor, prof. Silke Paschen, 5 wspólnych publikacji),
- Instytut Chemii Nieorganicznej Narodowego Uniwersytetu Lwowskiego we Lwowie na Ukrainie (dr Vasyl Zaremba, dr Bohdana Belan, 3 wspólne publikacje),
- Wydział Fizyki Uniwersytetu Johannesburskiego (prof. André Strydom, 3 wspólne publikacje),
- Centrum Atomowe Bariloche w Bariloche w Argentynie (prof. Julian Sereni, 2 wspólne publikacje),
- Instytut Technologii Jądrowej w Sacavém w Portugalii (dr Piotr Gaczyński, 1 wspólna publikacja),
- Wydział Fizyki i Astronomii, Uniwersytet Stanu Iowa w Ames w Stanach Zjednoczonych (dr Sergey L. Bud'ko, 1 wspólna publikacja),
- Wydział Fizyki Państwowego Uniwersytetu Moskiewskiego w Moskwie w Rosji (dr Tatiana Ivanova, 1 wspólna publikacja).

VIII. RECENZJE ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH

Habilitant jest recenzentem artykułów naukowych publikowanych w czasopismach Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego „Physical Review B" i „Physical Review Letters", a także kilku czasopism o niższej randze, w tym także materiałów pokonferencyjnych.

IX. DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA

Ze względu na badawczy charakter instytucji, w której pracuje habilitant, jego dotychczasowa działalność dydaktyczna była ograniczona do nieformalnej (przed doktoratem) lub formalnej (po doktoracie) opieki naukowej nad kilkoma studentami wrocławskich uczelni odbywających praktyki zawodowe w INTiBS PAN we Wrocławiu oraz do pełnienia funkcji recenzenta 2 prac magisterskich wykonanych w Instytucie.

Pikul

X. DZIAŁALNOŚĆ POPULARYZATORSKA

Habilitant jest aktywnym popularyzatorem fizyki. Jego dotychczasowa działalność popularyzatorska przyjmowała formę:

- wygłaszania wykładów pt. „O budowie materii, czyli dlaczego można nożem przekroić pietruszkę" oraz „O promieniowaniu i promieniotwórczości, czyli czy telewizor promieniuje" dla uczestników kilku edycji Dolnośląskiego Festiwalu Nauki we Wrocławiu oraz (poza Festiwalem) dla wycieczek szkolnych,
- wygłoszenia wykładu pt. „Maria Skłodowska–Curie – życie i (promienio)twórczość" dla słuchaczy Uniwersytetu Trzeciego Wieku w Oleśnicy koło Wrocławia,
- wygłoszenia wykładu pt. „Świat według Daltona, czyli z czego wszystko jest zbudowane" dla studentów Uniwersytetu Dzieci we Wrocławiu,
- wygłoszenia wykładu pt. „Ciężkie fermiony dla opornych" dla uczestników „Letnich Warsztatów Fizykochemii Ciała Stałego <Niskie Łąki 2007>" w INTiBS PAN we Wrocławiu,
- prowadzenia zajęć laboratoryjnych dla uczestników kilku edycji Letnich Warsztatów Fizykochemii Ciała Stałego „Niskie Łąki" w INTiBS PAN we Wrocławiu,
- wielokrotnego oprowadzania wycieczek szkolnych po laboratoriach INTiBS PAN we Wrocławiu.

XI. CZŁONKOSTWO W ORGANIZACJACH

Habilitant jest członkiem dwóch stowarzyszeń naukowych w Polsce:

- Polskiego Towarzystwa Fizycznego (od 2005 roku),
- Societas Humboldtiana Polonorum (od 2006 roku).

Adam Pikul
19.06.2012