

Prof. dr hab. Marta Cieplak  
Instytut Fizyki PAN  
Al. Lotników 32/46,  
02-667 Warszawa

Warszawa, 19.08.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jarosława Juraszka pt.  
“Określenie symetrii przerw energetycznych w dwupasmowych nadprzewodnikach  $\text{LaRu}_4\text{As}_{12}$  i  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  w oparciu o badania dolnego pola krytycznego”

Praca doktorska mgr Jarosława Juraszka wykonana została w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu pod kierunkiem promotora prof. dr hab. Tomasza Cichorka. Tematem pracy są badania wybranych nadprzewodników z grupy wypełnionych skutterudytów, czyli związków o ogólnym wzorze  $\text{MT}_4\text{Pn}_{12}$  (gdzie M może być metalem alkalicznym, metalem ziem alkalicznych, lantanowcem lub aktynowcem,  $T=\text{Fe}$ , Os, lub Ru, zaś  $\text{Pn}=\text{P}$ , As, lub Sb). Zainteresowanie tymi materiałami wynika z faktu, że co prawda większość z nich ma niską temperaturę przejścia do stanu nadprzewodzącego,  $T_c$  (a niektóre z nich wręcz nie nadprzewodzą), to ich własności nadprzewodzące mogą być dość niezwykle, ponieważ w wielu przypadkach są to nadprzewodniki wielopasmowe, co prowadzi często do obecności dwóch różnych przerw nadprzewodzących o różnych symetriach. Choć nie wydaje się, żeby efekty te prowadziły szybko do jakichś interesujących zastosowań, tym niemniej są one bardzo ciekawe z czysto poznawczego punktu widzenia.

Rozprawa doktorska oparta jest na czterech artykułach naukowych, które ukazały się w druku w latach 2016-2020 w dobrych albo bardzo dobrych czasopismach o międzynarodowym zasięgu (współczynniki impact factors między 0.7, a 9.2):

[A1] J. Juraszek, Z. Henkie, and T. Cichorek, Specific heat of the filled skutterudite superconductor  $\text{LaOs}_4\text{As}_{12}$ , *Acta Phys. Pol. A* 130, 597 (2016).

[A2] J. Juraszek, Ł. Bochenek, R. Wawryk, Z. Henkie, M. Konczykowski, and T. Cichorek, Anomalous enhancement of the lower critical field deep in the superconducting state of  $\text{LaRu}_4\text{As}_{12}$ , *Phys. B: Condens. Matter* 536, 813 (2018).

[A3] J. Juraszek, K. Rola, M. Daszkiewicz, M. Samsel-Czekała, T. Cichorek, and Z. Henkie, Crystal growth, low-temperature specific heat, and electronic structure of the filled skutterudite compound  $\text{ThOs}_4\text{As}_{12}$ , *Phil. Mag.* 100, 1355 (2020).

[A4] J. Juraszek, R. Wawryk, Z. Henkie, M. Konczykowski, and T. Cichorek, Symmetry of Order Parameters in Multiband Superconductors  $\text{LaRu}_4\text{As}_{12}$  and  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  Probed by Local Magnetization Measurements, *Phys. Rev. Lett.* 124, 027001 (2020).

Wszystkie publikacje są wieloautorskie, mgr Juraszek jest we wszystkich pierwszym autorem. Do rozprawy dołączone są oświadczenia współautorów, które nie pozostawiają wątpliwości, że mgr Juraszek odegrał kluczową rolę w wykonaniu badań i przygotowaniu tych artykułów. Tytuł całej rozprawy doktorskiej jest identyczny z tytułem najważniejszego artykułu A4, opublikowanego w Physical Review Letters; badania opisane w rozprawie dotyczą jednak również kilku innych materiałów, i może szkoda, że fakt ten nie znalazł odzwierciedlenia w tytule rozprawy.

Publikacje są w języku angielskim, i włączone są do rozdziału piątego rozprawy wraz z oświadczeniami współautorów. Poprzedzone są one czterema rozdziałami napisanymi w języku polskim, które zawierają wprowadzenie do problemów poruszanych w pracy oraz opis metod eksperymentalnych. Praca zakończona jest podsumowaniem wyników (rozdział szósty), oraz dodatkami, w których zamieszczone są kolejno: opis przebiegu kariery naukowej oraz post scriptum zawierające krótki opis prac, które autor podjął jako kontynuację badań opisanych w rozprawie. Bibliografia zawiera 189 odnośników.

W rozdziale 1 autor prezentuje podstawowe definicje i krótki opis tych własności stanu nadprzewodzącego, które omawiane są w rozprawie, a więc dolnego i górnego pola krytycznego, głębokości wnikania, długości koherencji i struktury wiru; trochę szerzej omówiona jest symetria parametru porządku, w tym w nadprzewodnikach konwencjonalnych jedno- i wielopasmowych o izotropowej symetrii opisywanych uogólnioną teorią BCS, oraz w nadprzewodnikach niekonwencjonalnych, w których mechanizm nadprzewodnictwa nie jest pochodzenia fononowego, zaś symetria parametru porządku może być różna, i w szczególności może obejmować przypadki parowania trypletowego. Rozdział ten jest dobrze napisany, choć być może niezbyt szczęśliwie rysunek 6b, ilustrujący symetrię typu s+-, został włączony do podrozdziału o nadprzewodnikach konwencjonalnych, gdy tymczasem taka symetria jest możliwa również w przypadku niefononowego mechanizmu, jak to jest sugerowane dla nadprzewodników żelazowych.

Rozdział 2 przedstawia historyczny opis badań nadprzewodników z grupy wypełnionych skutterudytów, poczynając od materiałów o jednopasmowym i dwupasmowym nadprzewodnictwie typu BCS, aż po ciężkofermionowy związek  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , który wykazuje nadprzewodnictwo dwupasmowe o przypuszczalnie różnych symetriach parametru porządku dwóch różnych przerw nadprzewodzących, i który właśnie jest najciekawszym obiektem badań w niniejszej rozprawie. Opis przedsawiony w tym rozdziale jest bardzo wyczerpujący, i jest świadectwem bardzo dobrej znajomości tematyki badawczej przez autora rozprawy.

Rozdział 3 przedstawia metody technologiczne otrzymywania monokryształów wypełnionych skutterudytów. Technologia wysokotemperaturowej krystalizacji z fazy ciekłej jest dość skomplikowaną metodą. Na podkreślenie zasługuje fakt, że doktorant opanował tę technikę, i otrzymał samodzielnie kryształy  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  potrzebne do dalszych badań, co więcej, użył nieco zmodyfikowanej metody, z użyciem podwyższonego ciśnienia arsenu, do

wyhodowania monokryształów zupełnie nowego związku arsenowego,  $\text{ThOs}_4\text{As}_{12}$  (pozostałe kryształy arsenowe użyte w dalszych badaniach zostały wyhodowane przez współpracowników).

W rozdziale 4 autor opisuje metodę pomiaru lokalnego namagnesowania przy pomocy miniaturowych sond Halla, która to metoda została użyta do wyznaczenia dolnego pola krytycznego ( $H_{c1}$ ) badanych nadprzewodników. To właśnie pomiar  $H_{c1}$  okazał się najciekawszym wynikiem badań prowadzonych przez doktoranta, ponieważ pozwolił na jasne rozróżnienie jednopasmowych i dwupasmowych nadprzewodników. Czujniki Halla użyte w tych pomiarach dostarczone zostały przez współpracownika, prof. Konczykowskiego z Ecole Polytechnique, w pracowni którego doktorant odbył staż naukowy. Osiągnięciem doktoranta było zainstalowanie tych czujników w dwóch kriostatach operujących w temperaturach milikelwinowych, w kriostacie na  $^3\text{He}$ , oraz w chłodziarce rozcieńczalnikowej, oraz opracowanie odpowiedniej metody pomiarowej, która eliminowała zarówno szумы, jak i grzanie próbki przez prąd pomiarowy. Wyniki pomiarów przedstawione w artykułach dowodzą, że doktorant wywiązał się znakomicie z tego zadania.

Przechodzę teraz do krótkiego opisu artykułów załączonych w rozdziale 5. W pracy A1 przedstawiono wyniki badań ciepła właściwego nadprzewodnika  $\text{LaOs}_4\text{As}_{12}$  o  $T_c=3.2\text{K}$ , które porównano z danymi z literatury dla dwupasmowego nadprzewodnika  $\text{LaRu}_4\text{As}_{12}$  o znacznie wyższym  $T_c=10.4\text{K}$ . Celem badań była próba określenia, czy  $\text{LaOs}_4\text{As}_{12}$  może być nadprzewodnikiem wielopasmowym, ale wyniki nie były jednoznaczne ze względu na zbyt mały zakres temperatury pomiarowej. Tym niemniej, praca ta stanowiła wstęp do badań dolnego pola krytycznego w niższych temperaturach, opisanych w pracy A4.

Praca A2 jest pierwszą, w której opisano pomiary  $H_{c1}$  dla wyżej wspomnianego dwupasmowego nadprzewodnika  $\text{LaOs}_4\text{As}_{12}$ , przeprowadzone przez doktoranta w kriostacie na  $^3\text{He}$  w temperaturze  $T=0.4\text{K}$ . Zaobserwowano wzmocnienie  $H_{c1}$  w niskich temperaturach, co wskazało na wzrost gęstości nośników nadprzewodzących na skutek otwierania drugiej przerwy nadprzewodzącej. Wyniki tych pomiarów były jednoznaczne, ale jednocześnie sugerowały konieczność rozszerzenia pomiarów na bardziej dokładne w zakresie jeszcze niższych temperatur.

Praca A3 opisuje technologię otrzymywania, i własności monokryształów  $\text{ThOs}_4\text{As}_{12}$  z grupy wypełnionych skutterudydów. Zbadano własności strukturalne i zmierzono niskotemperaturowe ciepło właściwe. Pomiary wykazały brak nadprzewodnictwa i bardzo niską gęstość stanów wskazującą na semimetaliczny charakter materiału, potwierdzony przez obliczenia struktury elektronowej, przeprowadzone przez współpracowników.

Najważniejsza spośród przedstawionych przez doktoranta prac jest praca A4, w której opisano badania  $H_{c1}$  w temperaturach milikelwinowych w zakresie powyżej  $0.16\text{K}$ , przeprowadzone dla czterech materiałów z grupy wypełnionych skutterudydów. Podczas gdy w dwóch z nich,  $\text{LaOs}_4\text{Au}_{12}$  oraz  $\text{PrRu}_4\text{As}_{12}$ , zaobserwowano zależność  $H_{c1}$  od temperatury dobrze opisaną przez teorię BCS dla jednopasmowego nadprzewodnika o symetrii s, w dwóch pozostałych,  $\text{LaRu}_4\text{As}_{12}$  oraz w ciężkofermionowym  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  zależność ta pokazuje silne

wzmocnienie  $H_{c1}$  poniżej zredukowanej temperatury  $T/T_c$  równej około 0.3, wskazujące na dwupasmowe nadprzewodnictwo, przy czym w obu przypadkach przerwa nadprzewodząca, która otwiera się w wyższych temperaturach ma symetrię typu s. Analiza zależności  $H_{c1}(T)$  wskazała na słabe sprzężenie międzypasmowe, i dramatycznie odmienną symetrię mniejszej przerwy nadprzewodzącej, która w pierwszym z tych materiałów jest izotropowa, zaś w ciężkofermionowym – anizotropowa, wskazująca na obecność linii lub punktów nodalnych.

W post scriptum autor wspomina o rozszerzeniu pomiarów dwupasmowych nadprzewodników na jeszcze niższe temperatury (powyżej 7 mK), i na materiały naświetlone wysokoenergetyczną wiązką elektronów, co wprowadza defekty atomowe; wpływ defektów na przerwy nadprzewodzące i sprzężenie międzypasmowe pozwala na dodatkową ocenę natury przerw – nie omawiam tutaj tych wyników, ponieważ nie wchodzą one w skład rozprawy.

Tym niemniej, opis zamieszczony w post scriptum wskazuje, że badania prowadzone przez doktoranta pozwoliły na rozwój bardzo ciekawej nowatorskiej metody pomiarowej, dzięki której będzie możliwe dokładniejsze zbadanie natury przerw energetycznych w niekonwencjonalnych nadprzewodnikach; być może po raz pierwszy uda się udowodnić istnienie trypletowego nadprzewodnictwa? Byłby to niewątpliwie jeden z ciekawszych wyników w fizyce nadprzewodników ostatnich lat.

Cała rozprawa napisana jest jasnym językiem, i czyta się ją z przyjemnością. Z obowiązku recenzenta wynotowałam kilka drobnych błędów edytorskich:

- We wprowadzeniu jest sformułowanie „znaczenie efektów wielopasmowych na nadprzewodnictwo”, zamiast „wpływ efektów”
- Str.4, pod równaniem (1.4): „zależność logarytmu naturalnego z bezwymiarowego parametru Ginzburga-Landaua... jest znikomo mała” – zależność od czego?
- Str.5, pod równaniem (1.9): „ $r$  – środek jednostki objętości” – chyba chodzi o współrzędną?
- Str.10, tabela w rys.8 : funkcja przerwy energetycznej dla „C”, jest  $\Delta_0|k_y \pm ik_y|$  zamiast  $\Delta_0|k_x \pm ik_y|$
- Str.19, w opisie technologii: „proces krystalizacji przebiega podczas schładzania w zakresie temperatur od 850 C do 780 C”; a na rysunku 11 maksymalna temperatura procesu jest 820 C ?
- Str.65: brak jest ostatniej strony z supplemental materials do A4 z rysunkiem S7.
- Wreszcie, do rozprawy nie zostało dołączone streszczenie, które jest wymagane ustawą – są wprawdzie streszczenia poszczególnych artykułów, ale potrzebne jest ogólne streszczenie rozprawy.

Nie mogę się też oprzeć wrażeniu, że rozprawa, której główne części były opublikowane ponad 2 lata temu, powstawała wyjątkowo długo... co być może związane jest z zaangażowaniem doktoranta w opisane w post scriptum nowe badania.

Mimo tych drobnych uwag krytycznych, oceniam przedstawioną mi do recenzji rozprawę bardzo pozytywnie, i uważam, że zasługuje ona na wyróżnienie, zarówno ze względu na rozwój nowatorskiej techniki pomiarowej, jak też na wyjątkową wagę otrzymanych wyników, i wreszcie, na bardzo duży i różnorodny wkład pracy doktoranta (praca technologiczna, eksperymentalna, i interpretacja wyników).

W mojej ocenie rozprawa spełnia warunki określone w art.13 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017, poz.1789) oraz rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30.01.2018 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018, poz. 261). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Jarosława Juraszka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Marta Cieplak