



Rochester, 25. IX. 2022

Ocena dorobku naukowego oraz recenzja osiągnięcia habilitacyjnego dr Macieja Zgirskiego pt. „Stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali”

Dr Maciej Zgirski ukończył z wyróżnieniem studia magisterskie na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej w roku 2003. W czasie studiów, w ramach programu Socrates-Erasmus, przebywał na rocznym stażu naukowym na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Jyväskylä w Finlandii. W tymże uniwersytecie w styczniu 2004 rozpoczął on studia doktoranckie w Nanoscience Center, które ukończył w 2008 roku, broniąc pracę pt. „Experimental study of fluctuations in ultra-narrow superconducting nanowires,” wykonaną pod kierunkiem Prof. K. Yu. Arutyunova. W okresie badań nad doktoratem powstało 8 prac opublikowanych w czołowych czasopismach. Najwyżej cytowana jest praca, która ukazała się w 2005 w Nano Letters pt. „Size dependent breakdown of superconductivity in ultranarrow nanowires” (137 cytowań; Web of Science; IX 2022) Bezpośrednio po doktoracie dr Zgirski odbył dwuletni staż podoktorski w Quantronics Group w CEA Saclay we Francji, co zaowocowało publikacją nt. efektu pułapkowania kwazicząstek przez stany związane Andreeva w punktowych kontaktach nadprzewodzących (Phys. Rev. Lett., 2011, 58 cytowań; dr Zgirski jest pierwszym autorem).

Po powrocie do kraju, dr Zgirski podjął pracę na stanowisku naukowca w Instytucie Fizyki PAN (IFPAN) w Warszawie w Laboratorium Kriogeniki i Spintroniki i włączył się on w badania Laboratorium w dziedzinie nanostruktur półprzewodnikowych i spintroniki. Stworzył też zupełnie od podstaw, poprzez zakupy aparaturowe z prowadzonych przez siebie grantów badawczych, laboratorium zawierające dwie chłodziarki (Triton 400 i Heliox) wraz z pełnym wyposażeniem pomiarowym. W tym laboratorium prowadzi autorski program naukowy poświęcony badaniom nanostruktur nadprzewodnikowych i złączom Josephsona w zakresie nanotermometrii stochastycznej. Dwukrotnie, w 2014 i 2021, dr Zgirski przebywał na relatywnie krótkich stażach naukowych w Laboratorium Niskich Temperatur Uniwersytetu Aalto w Finlandii.

Ocena dorobku naukowego

Web of Science podaje, że na dorobek naukowy dr Zgirskiego składa się 21 „produktów” naukowych, w których w większości jest on pierwszym autorem i które wszystkie zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach o światowym zasięgu z IF znacznie przekraczającym 1.0 (wyjątek Materials Science-Poland). O ile więc liczba prac nie jest imponująca—średnio jedna praca rocznie—to już ich jakość zdecydowanie tak. Trzeba w tym miejscu podkreślić, że wszystkie prace powstawały w relatywnie niedużych, jak na współczesną fizykę doświadczalną, zespołach badawczych i w zdecydowanej większości dr Zgirski był nie tylko inspiratorem prac i wykonawcą, ale też autorem manuskryptu. Wśród prac powstałych po doktoracie, a niewłączonych do osiągnięcia habilitacyjnego należy wyróżnić pracę opublikowaną po stażu podoktorskim w grupie w Saclay, która, jak podano wcześniej, ma 58 cytowań.

Podobnie do całkowitej liczby publikacji przedstawia się podany przez Web of Science indeks Hirscha (H), który wynosi 11, czyli jest przyzwoity, ale niewybitny. Tutaj należy jednak wziąć pod uwagę, że trzy prace składające się na osiągnięcie habilitacyjne zostały opublikowane w ciągu ostatnich trzech lat i wyraźnie dopiero zaczynają być cytowane. Pozostałe dwie mają ponad 10 cytowań. Ogólna liczba cytowań wynosi 580 w 452 różnych artykułach naukowych. Wśród tych cytowań prawie jedna czwarta przypada na wspomnianą wyżej publikację z Nano Letters (2012 r.), co świadczy o wysokiej wartości naukowej doktoratu dr Zgirskiego.

Dr Zgirski już po uzyskaniu doktoratu wygłosił 10 zaproszonych seminariów w różnych ośrodkach naukowych w Polsce i zagranicą, oraz 4 zaproszone wykłady konferencyjne. Jest aktywnym recenzentem 8-miu czasopism naukowych wydawanych przez American Physical Society i American Institute of Physics. Pokazuje to, że osiągnął on już pewną rozpoznawalność naukową, a jego działalność badawcza zaczyna być zauważana w środowisku naukowym.

Niezwykle imponująca jest ilość i finansowa wartość grantów badawczych, w których dr Zgirski był (dwa; sumaryczna wartość 2 328 kPLN), bądź jest (dwa; sumaryczna wartość 4 541 kPLN) Głównym Wykonawcą. Był on też Wykonawcą w dwuletnim, dużym (5 M€) grantie Unii Europejskiej. W oparciu o tak szerokie finansowanie potrafił zdobyć on samodzielność w wyborze kierunku badań naukowych i zbudować od podstaw swoje laboratorium. Umiejętność zdobywania finansowania badań naukowych jest niezwykle cenną wartością we współczesnym świecie nauki i jest to duży plus dla dr Zgirskiego.

W ramach działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej habilitant prowadził w latach 2011 i 2012 sekwencje 5-ciu wykładów zatytułowanych „Czy obiekty makroskopowe zachowują się kwantowo?” w ramach Współczesnych Problemów Fizyki, dla studentów 5-tego roku Wydziału Fizyki PW, oraz w 2013 seminarium dla studentów Wydziału Fizyki UW w ramach cyklu „Opowieści Nanotreści.” Był promotorem czterech prac magisterskich i jednej licencjackiej; a od 2018 roku pełni rolę promotora pomocniczego dla jednego doktoranta w IFPAN. Jednocześnie latach 2018-20 był też opiekunem naukowym post-doc’a finansowanego z grantu dr Zgirskiego. W 2012 prowadził Warsztaty dla Młodych Naukowców w IFPAN, oraz stoisko na Pikniku Naukowym Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik ŻYCIE (2013). W ramach działalności zawodowej w IFPAN, habilitant jest członkiem Rady Naukowej i Komisji Rekrutacyjnej Szkoły Doktorskiej „Warsaw-4-PhD.” Uważam, że można uznać, że habilitant wykazuje się dostateczną umiejętnością pracy organizacyjnej, edukacyjnej i popularyzatorskiej.

Będąc zatrudnionym w IFPAN, dr Zgirski otrzymał pierwszą nagrodę w XII edycji (2015) konkursu ABB na Najlepszą Pracę Magisterską bądź Doktorską, za wykonaną pod jego kierunkiem pracą magisterską Łukasza Pawliszka, oraz otrzymał nagrodę zbiorową Dyrektora IFPAN za najlepszą publikację w roku 2016.

Ocena osiągnięcia habilitacyjnego

Osiągnięcie habilitacyjne dr Zgirskiego składa się z pięciu wybranych z jego dorobku prac, ułożonych chronologicznie, opublikowanych w latach 2015-2021, które są ściśle ze sobą powiązane i ogólnie dotyczą nanotermometrii stochastycznej w oparciu o czujnik w postaci krótkiego nanodrutu nadprzewodzącego (mostek Dayema) bądź złącza Josephsona. Wszystkie prace są kilku-autorskie, ale dr Zgirski jest pierwszym autorem w 4-rech z tych prac, zaś pozostała praca jest dwuautorska. Według subiektywnej oceny samego habilitanta, jego udział procentowy w wykonaniu i opracowaniu badań opisanych w tych pracach jest na poziomie powyżej 90%. Taki wniosek można wysnuć po przeczytaniu autoreferatu dołączonego do prac habilitacyjnych, który,

notabene, ma charakter artykułu promocyjnego. Oczywiście jest to spora przesada i oświadczenia współautorów wskazują na ich istotny wkład w prace, ale jednocześnie potwierdzają, że habilitant odpowiadał on za kierownictwo sprawcze w każdej z publikacji, w sensie koncepcji danego doświadczenia, jego wykonania i opracowania, a następnie przygotował i napisał manuskrypty wszystkich prac. Nawet w przypadku pracy H2, która powstała we współpracy z grupą Prof. Pekola z Uniwersytetu Aalto, jak wynika z treści pracy, eksperymenty były przeprowadzone w laboratorium dr Zgirskiego w IFPAN.

Praca H1 jest poświęcona możliwości użycia struktury słabego mostka nadprzewodzącego bądź złącza Josephsona jako generatora liczb losowych i opublikowana była w 2015 roku w Phys. Rev. Appl. Jest to ciekawa koncepcja opierająca się na probabilistycznym charakterze przełączeń takich struktur ze stanu nadprzewodzącego do stanu oporowego wynikająca z ich nieliniowych własności. Złącze Josephsona pobudzone krótkim impulsem elektrycznym o amplitudzie bardzo bliskiej prądowi krytycznemu złącza może przełączyć się do stanu oporowego pod wpływem np. fluktuacji termicznych. W pracy jest to modelowane jako ruch masy w potencjale sinusoidalnym o pewnym nachyleniu (tzw. washboard potential), a równoważnym modelem jest wirujące wahadło w ośrodku lepkiem. Oczywiście krytycznym elementem jest tutaj pokonanie bądź niepokonanie lokalnego maksimum potencjału (pełna bądź tylko częściowa rotacja wahadła), który, jak postuluje praca, ma charakter stochastyczny i jest równoważny do rzutów monetą. Oczywiście w przypadku złącz Josephsona prawdopodobieństwo nie musi być 50/50, bo można je zmieniać przez zmianę nachylenia potencjału (odpowiednio, lepkości ośrodka wahadła). Przytoczone w pracy eksperymenty potwierdzają stochastyczny charakter przełączeń nanostruktur josephsonowskich. W przedstawionych w pracy badaniach użyte były struktury typu mostka Dayema, charakteryzujące się znikomą pojemnością. Ciekawe byłyby doświadczenia z użyciem złącz z niezerową pojemnością, czyli wspomnianych w pracy złącz typu RCSJ (resistively and capacitively shunted junctions), w których przy przełączaniu krótkimi impulsami prądowymi występują zjawiska chaotyczne [np. Phys. Rev. B 37, 3778 (1988)].

Praca H2, opublikowana w 2018 w Phys. Rev. Appl., jest w mojej ocenie najbardziej nowatorska w punkcie widzenia fizyki. Przedstawia ona nowy sposób pomiaru temperatury w nanostrukturach w niskich temperaturach. Tradycyjnie używa się w tym celu np. nanobolometry nadprzewodnikowe wykorzystujące jako termometr krzywą przejścia nadprzewodzącego w temperaturze krytycznej. Ostrość przejścia wyznacza rozdzielczość temperaturową, a czułość wielkość sprzężenia pomiędzy czujnikiem a rezerwuarem cieplnym. Najczulsze bolometry tego typu są w stanie mierzyć energię pojedynczych fotonów optycznych, jednakże ich największym mankamentem jest, że ich rozdzielczość czasowa jest bardzo ograniczona, typowo $\sim 0.5 \mu\text{s}$, gdyż aby osiągnąć odpowiednią czułość, czujnik temperatury musi być bardzo słabo związany z rezerwuarem, a wielkość tego sprzężenia warunkuje czas odpowiedzi bolometru. Praca H2 w dużej mierze omija te ograniczenie przez zastosowanie złącza Josephsona jako nanotermometru, a dokładniej zależności amplitudy prądu krytycznego złącza w funkcji temperatury z rozdzielczością rzędu 10 mK. Pomiar temperatury odbywa się metodą próbkowania, co, jak zaznaczają autorzy, zawęża znacznie typy pomiarów jakie można wykonywać, bo np. mierzony impuls cieplny musi być czasowo skorelowany z impulsem próbkującym, ale za to zademonstrowana rozdzielczość czasowa jest na poziomie 10 ns, limitowana aparaturowo (minimalna szerokość impulsu prądowego użytego w doświadczeniu) i zdaniem autorów może być łatwo zredukowana do 1 ns, przez zastosowanie bardziej zaawansowanego sprzętu. Tego typu dynamika czasowa jest imponująca w porównaniu z nanobolometrem i rzeczywiście pozwoliłaby,

jak sugerują autorzy, na pomiary dyfuzji ciepła w różnego typu nanostrukturach. W pracy jako element Josephsonowski użyto mostek Dayema wykonany z Al (ze względu na łatwość fabrykacji, jak stwierdzają autorzy), wydaje się, że lepsze rezultaty można by osiągnąć przy użyciu tzw. mostka o zmiennej grubości. Pomijalny byłby wtedy efekt dyfuzji wzbudzonych kwazicząstek do kontaktów mostka, który to efekt autorzy dość arbitralnie pomijają, a który jest typowy dla mostków Dayema.

Praca H3 (Phys. Rev. Appl., 2019) jest do pewnego stopnia rozwinięciem pracy H1, gdzie mostek Dayema spełniał rolę generatora liczb losowych, Oczywiście aby generowane liczby były zupełnie przypadkowe nie może być żadnych korelacji pomiędzy nimi (podobnie jak przy rzutach monetą). W H1 proces przełączania się złącza Josephsona był opisany jako proces stochastyczny. Praca H3 zadaje pytanie czy mogą zachodzić korelacje przy przełączaniu złącza ciągiem krótkich impulsów prądowych? Ogólna odpowiedź jest oczywiście „tak,” gdyż zależy to od częstości powtarzania impulsu przełączającego oraz wewnętrznej dynamiki systemu przełączanego. Mając do dyspozycji swój układ pomiarowy autorzy przeprowadzają całą serię eleganckich doświadczeń zmieniając częstotliwość powtarzania i kształt impulsów przełączających oraz temperaturę systemu, czyli mostka Dayema. Sam mostek, podobnie jak we wcześniejszych pracach, został wykonany z Al i jest to wdzięczny materiał do takich pomiarów (o ile się ma odpowiednią chłodziarkę), bo w nadprzewodzącym Al czas relaksacji elektron-fonon jest zdecydowanie wolniejszy (~1 ns wg. H3) niż w innych nadprzewodnikach. Stosunkowo łatwo jest więc wytworzyć stan kwazirównowagowy, w którym podsystemy, elektronowy i fononowy, są w wewnętrznej równowadze i opisane są temperaturami, odpowiednio elektronową i fononową, ale wzajemnie są w one nierównowadze (temperatury są różne). Jest to tzw. model dwutemperaturowy i został on po raz pierwszy opracowany dla metali przez Kaganova, Lifshitz'a i Tanatarova w 1957 [Zh. Eksp. Teor. Fiz. 31 232 (Sov. Phys.-JETP, 4, 173)] i przez lata był i jest nadal z powodzeniem stosowany w analizie stanów kwazi-nierównowagowych w nadprzewodnikach. Model ten jest użyty w H3 (rys. 7), aczkolwiek bez bezpośredniego odnośnika. Zgodnie z ogólnymi oczekiwaniami, autorzy konkludują, że gdy odstęp czasowy pomiędzy impulsami przełączającymi przewyższa (najlepiej wielokrotnie) czas oddziaływania elektron-fonon to korelacje nie zachodzą i można stosować z powodzeniem koncepcję „rzutu monetą.” Przy zmniejszaniu odstępu czasowego pomiędzy impulsami (wzrost częstotliwości powtarzania), korelacje się pojawiają i mają skomplikowany charakter, ponieważ są zarówno krótko- (poprzedni impuls przełączający) jak i długo-czasowe (wpływ wcześniejszych impulsów). W drugiej części pracy autorzy dodali dodatkowe impulsy elektryczne poprzedzające właściwe impulsy przełączające. W efekcie zaobserwowali gwałtowne spowolnienie procesu relaksacji mostka, które interpretują jako nierównowagę termiczną pomiędzy podłożem na którym jest osadzony mostek Dayema, a jego zamocowaniem w kriostacie. Jest to wynik nieciekawym w tym sensie, że jest zjawisko niepożądane i w praktycznych układach elektroniki nadprzewodnikowej robi się wszystko, aby do takiej nierównowagi nie dopuścić, przez np. stosowanie podłoży Al_2O_3 o bardzo dużej przewodności cieplnej, bądź chłodzenie struktur nadciekłym helem.

Praca H4 (Phys. Rev. Appl, 2020) jest ciekawą prezentacją zastosowania opracowanej przez dr Zgirskiego metody nanotermometrii stochastycznej opartej o przełączanie się nadprzewodzącego mostka Dayema do pomiaru dynamiki procesu dyfuzji gorących kwazicząstek w nanodrucie nadprzewodzącym. W przeprowadzonym, bardzo eleganckim eksperymencie elektrony są grzane oporowo w mikrostrukturze miedzianej, a następnie wstrzykiwane do nanopaska nadprzewodzącego, gdzie dyfundują w kierunku mostka zmieniając jego temperaturę, która jest

mierzona przy pomocy układu próbkującego opisanego we wcześniejszych pracach. Ponieważ termometria stochastyczna ma bardzo dużą rozdzielczość czasową (ok. 10 ns wg, H2), można analizować transport kwazicząstek w skali czasu, a dokładniej w funkcji opóźnienia pomiędzy impulsem generującym kwazicząstkę w Cu, a impulsem próbkującym (nanotermometria jest metodą stroboskopową). Przytoczone w pracy rezultaty są naprawdę spektakularne, charakteryzują się bardzo niskim poziomem szumów i pozwalają niejako „obejrzeć” dyfuzję kwazicząstek na drodze 60 μm pomiędzy punktem wstrzyknięcia ich do paska nadprzewodzącego a czujnikiem (mostkiem Dayema) dla różnych temperatur paska i różnych prądów wstrzykiwania. Rozdzielczość temperaturowa w tych pomiarach na poziomie poniżej 1 mK przy wspomnianej wcześniej rozdzielczości czasowej (10 ns). Powyższe pomiary są dokładnie przeanalizowane przez autorów w odniesieniu do dynamicznego modelu przepływu ciepła i dane doświadczalne bardzo dobrze się zgadzają w tym modelem. Autorzy przeprowadzili też szereg innych testów, pokazując np. że odwrócenie polaryzacji impulsu grzejącego element Cu przy zachowaniu jego amplitudy nie wpływa w ogóle na wielkość grzania i dyfuzji kwazicząstek. Z doświadczalnego punktu widzenia praca H4 jest niewątpliwie najciekawszą w osiągnięciu ze względu na jakość (stosunek sygnału do szumu) i rangę otrzymanych wyników. Habilitant, zresztą, przytacza w autoreferacie właśnie wynik tej pracy jako jego największe osiągnięcie.

Praca H5 jest ostatnią z cyklu i została opublikowana w Phys. Rev. B w 2021 r. Jest ona kontynuacją pracy H3, która z kolei była kontynuacją pracy H1. Jak to często bywa w takich „serialach,” jest ona najsłabsza z cyklu, bo w dużej mierze opiera się na badaniach próbki poprzednio użytej w H3 i wręcz przenosi pewne wyniki doświadczalne wprost z pracy H3. W pracy badane są dwa mostki Dayema, A i B, ale nie jest oczywiste z tekstu jakie są ich cechy charakterystyczne (wymiary). Można jedynie wnosić, że mostek A ma szerokość 70 nm (rys. 1), a mostek B 60 nm, bo na rys. 3 wyniki są przeniesione bezpośrednio w pracy H3, a tam był badany jedynie mostek o szerokości 60 nm. Ogólnie gro wyników prezentowanych w pracy jest dla mostka B, a mostek A, poza rys. 1 i jego omówieniem się nie pojawia. Można się zastanawiać, dlaczego autorzy nie przebadali w pełni obu struktur, dałoby to im znacznie szerszy materiał doświadczalny przydatny do weryfikacji modelu numerycznego przedstawionego w dalszej części pracy.

Celem pracy H5 jest pokazanie, że gdy zarówno częstość jak i amplituda impulsów przełączających mostek wyraźnie wzrasta, w jego odpowiedzi zaczynają się pojawiać nowe efekty korelacyjne. Dotyczy to szczególnie struktur złączowych charakteryzujących się znaczącą pętlą histerezy przy przełączaniu, tzn., że po przełączeniu struktura pozostaje w stanie oporowym aż do momentu, gdy prąd polaryzacji nie zostanie zmniejszony do odpowiednio niskiej wartości. W ogólności, efekt ten jest szczególnie widoczny w przypadku bardzo długich mostków, czy wręcz nanodrutów. W takich przypadkach przejście do stanu oporowego odbywa się poprzez formowanie się początkowo tzw. gorącego punktu, gdzie lokalna temperatura przewyższa temperaturę krytyczną materiału nanodrutu. Następnie gorący punkt się stopniowo rozszerza na cały nanodrut poprzez dyfuzję kwazicząstek i grzanie Joule’a. Dynamika takiego przełączania jest bardzo intensywnie studiowana w ciągu ostatnich 20-tu lat ze względu na zastosowanie nanodrutów nadprzewodzących do bardzo sprawnej detekcji pojedynczych fotonów optycznych. W celu dokładnej analizy dynamiki przełączania się mostka Dayema, w pracy wykonano doświadczenie analogiczne do tego wykonanego w pracy H3, używając zmienioną sekwencję i wielkość („przegrzanie”) impulsów przełączających. Autorzy pokazali, że można doprowadzić do pozytywnego sprzężenia zwrotnego, powodującego, że mostek będzie się stochastycznie przełączał pomiędzy stanami zerowym i oporowym (napięciowym) pozostając w nich przez

makroskopowy okres czasu, w porównaniu z czasem powtarzania impulsów przełączających. Autorzy opracowali też numeryczny model tego zjawiska przełączania grupowego i uzyskali jakościową zgodność wyników. W moim zrozumieniu w reżimie przełączeń grupowych, mostek zachowuje się jak fluktuator dwupoziomowy i ciekawym by było zbadać np. jego charakterystyki szumowe, które mogłyby potwierdzić stochastyczny charakter tego zjawiska. W końcowej części pracy, autorzy przedstawiają jakie nowe możliwości detekcyjne przedstawia system, w którym zachodzą przełączania grupowe.

Podsumowując prace habilitacyjne, uważam je za bardzo dobre, szczególnie z punktu widzenia doświadczalno-technicznego. Jedyne zastrzeżenia można mieć do autoreferatu, który jest, jak wspominałem wcześniej, „propagandą sukcesu,” a mógłby np. przedstawić osiągnięcie habilitacyjne w szerszym tle badań nad stanami kwazi-nierównowagowymi w strukturach nadprzewodnikowych uwzględniając np. badania optyczne i optoelektroniczne, gdzie osiągane są dużo wyższe, rzędu pojedynczych pikosekund, rozdzielczości czasowe. Korzystnym też byłoby dodanie do autoreferatu części przedstawiającej nowe pomysły autora dotyczące zastosowań nanotermometrii w przyszłym badaniu zjawisk fizycznych w nanostrukturach.

Wniosek końcowy

Przedstawione osiągnięcie habilitacyjne w zakresie fizyki uważam za bardzo dobre, a w zakresie fizyki stosowanej bądź inżynierii za wybitne. Ogólny dorobek naukowy dr Zgirskiego jest też na dobrym poziomie. Jest on jest samodzielnym badaczem, a jego zdolności do pozyskiwania finansowania dla własnych pomysłów badawczych są imponujące. Dotychczasowe osiągnięcia kwalifikują go w pełni do stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Roman Sobolewski

Prof. Dr. Roman Sobolewski

Professor of Electrical and Computer Engineering, Physics, and Materials Science

Senior Scientist of Laser Energetics