

---

# UNIWERSYTET M. CURIE – SKŁODOWSKIEJ

Tel: (+48) 81 – 537 62 41  
Fax: (+48) 81 – 537 61 91  
Email: [doman@kft.umcs.lublin.pl](mailto:doman@kft.umcs.lublin.pl)  
Web: <http://kft.umcs.lublin.pl/doman>

Prof. dr hab. Tadeusz Domański  
Katedra Fizyki Teoretycznej,  
Instytut Fizyki, 20-031 Lublin

---

Lublin, 30 sierpnia 2022 r.

Recenzja rozprawy habilitacyjnej doktora inżyniera Macieja Zgirskiego pt. **„Stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali”** oraz ocena jego dorobku naukowego i dydaktycznego

Doktor inżynier Maciej Zgirski jest absolwentem studiów stacjonarnych na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, gdzie wybrał specjalizację joniki ciała stałego. Ukończył je z wyróżnieniem we wrześniu 2003 roku, uzyskując nagrodę firmy FIAT za swoją pracę magisterską. Podczas studiów uczestniczył w programie wymiany studenckiej Socrates-Erasmus, spędzając rok akademicki 2001/2002 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Jyväskylä (Finlandia). Od stycznia 2004 roku do września 2008 roku Maciej Zgirski był uczestnikiem studiów doktoranckich w *Nanoscience Center* tegoż Uniwersytetu w Jyväskylä. Pracę doktorską pt. **Experimental study of fluctuations in ultra-narrow superconducting nanowires** przygotował pod kierunkiem Konstantina Arutyunova i obronił pomyślnie 26 września 2008 roku.

Przez kolejne dwa lata (2008-2010) dr inż. Maciej Zgirski przebywał na stażu po-doktorskim w grupie elektroniki kwantowej (*Quantronic Group*) w Centrum Energetyki Atomowej (CEA) w Saclay koło Paryża (Francja). Zajmował się wówczas doświadczalną spektroskopią stanów związanych Andreeva na kontaktach atomowych z nadprzewodnikami. Wymiernym efektem tego stażu był publikacja w prestiżowym czasopiśmie *Physical Review Letters*, w której pan Maciej Zgirski jest pierwszym autorem. Od grudnia 2010 roku został zatrudniony w Laboratorium Kriogeniki i Spintroniki (SL2.2) w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

W ramach współpracy nawiązanej z profesorem Jukką Pekolą pan Zgirski przebywał dwukrotnie z kilkumiesięczną wizytą w Laboratorium Niskich Temperatur na Uniwersytecie Aalto w Helsinkach (Finlandia). Pobyty naukowe dotyczyły konstrukcji czasowo-rozdzielczego termometru na bazie złącza Josephsona umieszczonego w koplanarnej mikrownęce oraz realizacji autorskiego projektu pt. *Quasiparticle diffusion and thermal relaxation in Meissner and vortex states*. Działalność naukowa poświęcona niekonwencjonalnej termometrii na bazie nanomostków nadprzewodzących jest podstawą aktualnie przedłożonej rozprawy habilitacyjnej. Od strony formalnej na rozprawę składa się tematycznie spójny cykl pięciu publikacji. W dalszej części przedstawię wykaz ważniejszych osiągnięć oraz merytoryczną ocenę prac Habilitanta.

[H1] M. Foltyn & M. Zgirski, Phys. Rev. Applied 4, 024002 (2015).

W pracy zaproponowano generator liczb losowych na bazie fluktuacji zaindukowanych przepływem prądu przez złącze Josephsona, które są związane ze stochastyczną naturą przejścia między stanem nadprzewodzącym i normalnym. Autorzy przedstawili ogólną zasadę protokołu w oparciu o impulsowy kształt czasowo-zależnego prądu (rysunek 2), dzięki czemu złącze tunelowe z porównywalnym prawdopodobieństwem jest w stanie nadprzewodzącym albo dyssypatywnym. W takich warunkach przepływ prądu przypomina ruch cząstki Browna w niemonotonicznym potencjale o kształcie typu *washboard*. Praktyczną realizację algorytmu generatora liczb losowych potwierdzono w pomiarach prądowo-napięciowej zależności nanomostka nadprzewodzącego glinu (*Dayem nanobridge*) o rozmiarach około  $30 \text{ nm} \times 600 \text{ nm}$ . Niekwestionowaną zaletą tak skonstruowanego generatora liczb jest możliwość wielokrotnego i bardzo szybkiego powtarzania procesu. Autorzy uzyskali wydajność na poziomie 10-100 kilobitów, wskazując realną perspektywę dalszej optymalizacji. Generator przeszedł pomyślnie serię testów na wiarygodny stopień losowości potwierdzonych przez National Institute of Standard and Technology i został opatentowany (numer patentu 227546).

[H2] M. Zgirski, M. Foltyn, A. Savin, K. Norowski, M. Meschke & J. Pekola, Phys. Rev. Applied 10, 044068 (2018).

Stochastyczny charakter przejścia między stanem nadprzewodzącym i dyssypatywnym w złączu Josephsona został zastosowany do konstrukcji termometru. Zasadnicza idea bazuje na temperaturowej zależności prądu przełączania  $j_{sw}$ , którą [w znakomitej zgodności ze wzorem Ambegaokara-Baratoffa (1)] przedstawiono na rysunku 2 dla nanomostka nadprzewodzącego glinu. Autorzy zaproponowali algorytm empirycznego pomiaru temperatury nanozłącza Josephsona wbudowanego między zewnętrzne makroskopowe rezerwuary o ustalonej temperaturze (przedstawionego na rysunku 4) według schematu *pump-and-probe*. W pewnej chwili układ jest impulsowo podgrzewany, za pomocą prądu o wartości przekraczającej  $j_{sw}$ , zaś po upływie czasu rzędu kilku nanosekund wysyłany jest im-

puls próbkujący (szczegółowy profil pokazano na rysunku 3). Wymuszona impulsami prądowymi zmiana temperatury jest oczywiście przejawem sytuacji nierównowagowej, jednakże skala procesów relaksacji układu elektronowego zachodzi na bezpiecznie dużo krótszym poziomie w porównaniu do czasowej rozdzielczości zaproponowanego termometru. Autorzy przedyskutowali mikroskopowe aspekty termometrii nanosekundowej rozdzielczości, uwzględniając elektronowo-fononowe i dyfuzyjne kanały propagacji energii w układzie. Zaletą tego rodzaju termometrów na bazie słabych złączy Josephsona są zarówno miniaturowe rozmiary (poniżej mikrometra) jak również zdolność pomiaru dynamicznie zmieniającej się temperatury (z precyzją rzędu nanosekund). Naturalnym ograniczeniem jest natomiast pułap niskich temperatur znacznie mniejszych od temperatury krytycznej nadprzewodnika, z którego wykonane jest złącze Josephsona.

[H3] M. Zgirski, M. Foltyn, A. Savin & K. Norowski,  
Phys. Rev. Applied **11**, 054070 (2019).

Za pomocą prądowego przełączania złącza Josephsona między stanem nadprzewodzącym i normalnym dokonano analizy procesów stochastycznych z nałożonymi warunkami korelacyjnymi. W tym celu użyto serii impulsów prądowych, zmieniając odległość czasową między nimi w zakresie od 94 do  $0,5 \mu\text{s}$  (rysunek 2). Pomiar przeprowadzono dla zestawu wybranych temperatur, które wpływały na wartość czasu relaksacji poprzez mechanizm rozpraszania elektronowo-fononowego oraz zjawiska dyfuzyjne (panele b oraz c na rysunku 6). Autorzy uzyskali w rezultacie kontrolowalny sposób stochastycznego lub w odpowiednim stopniu skorelowanego przełączenia złącza Josephsona między stanem nadprzewodzącym i dyssypatywnym. W granicy procesów niezależnych statystyka przełączenia wykazała standardowy charakter rozkładu bimodalnego (rysunek 3) natomiast w przypadku procesów silnie współzależnych autorzy zaobserwowali tendencję do pojawiania się panicznej dystrybucji (*panic distribution*). Zachowanie tego rodzaju przedstawiają panele b-e na rysunku 5. Autorzy szczegółowo przedyskutowali rolę procesów termalizacji istotnych zwłaszcza w granicy skorelowanych przełączeń, tzn. dla krótkich interwałów czasowych między impulsami prądowymi. Artykuł ten przedstawia oryginalny i wartościowy schemat empirycznego modelowania zjawisk stochastycznych, który może znaleźć zastosowanie w różnych dyscyplinach.

[H4] M. Zgirski, M. Foltyn, A. Savin, A. Naumov & K. Norowski,  
Phys. Rev. Applied **14**, 044024 (2020).

Autorzy zaproponowali metodę pomiaru współczynnika dyfuzji elektronów w nadprzewodzącym nanodrucie glinu. Schemat pomiarowy (zilustrowany na rysunku 1) dotyczył dyfuzji kwazicząstek wzbudzonych termicznie za pomocą pobocznie dołączonej wyspy metalicznej (wykonanej z miedzi) nagrzewanej krótkim impulsem prądowym. Propagacja kwazicząstek z lokalnie podgrzanego nadprzewodzącego glinu była analizowana

przy użyciu złącza Josephsona wbudowanego do nanodrutu w odległości  $60 \mu\text{m}$ . Najbardziej energetycznie wzbudzone elektrony docierały do tego złącza w czasie już około 30 nanosekund. Metodą probabilistyczną (omówioną w pracy [H2]) określono zmianę temperatury w zależności od czasu. Reprezentatywny zestaw wyników pokazano na rysunku 4. Optymalny przyrost temperatury  $\Delta T_e$  obserwowano po czasie kilkuset nanosekund, zależnie od temperatury termostatu  $T_{bath}$ . Na podstawie dynamicznego pomiaru temperatury w ramach scenariusza kwazijednowymiarowej dyfuzji cząstek swobodnych wyznaczono wartość współczynnika dyfuzji  $D \approx 100 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Zaproponowana przez autorów technika daje możliwość wglądu w trudny do empirycznej obserwacji proces dyfuzji elektronów, chociaż analiza modelowa (np. założenie kwazirównowagowej statystyki gazu fermionów) bazuje na trochę kontrowersyjnych uproszczeniach.

[H5] M. Zgirski, M. Foltyn, A. Savin & K. Norowski, Phys. Rev. B **104**, 014506 (2021).

W analogii do zagadnienia opisanego w pracy [H3] autorzy zbadali proces nierównowagowego podgrzewania nanodrutów nadprzewodnikowych (tworzących nanomostek Dayem-a) sekwencją impulsów prądowych o odpowiednio dobranej odległości czasowej między nimi. Każdy z impulsów powodował przekaz energii do układu elektronowego oraz fononowego, wpływając na podniesienie temperatury tych podukładów. Odległość między impulsami dobrano w taki sposób, by umożliwić podukładowi elektronowemu zrelaksowanie w przeciwieństwie do podukładu fononowego. Konsekwencją takiego scenariusza było sukcesywne podnoszenie temperatury i stopniowy wzrost współkorelacji stochastycznego przełączania nanozłącza Josephsona między stanem nadprzewodzącym i normalnym, zależnie od odległości czasowej między impulsami (rysunek 4). Autorzy wykazali, że skracanie czasu między impulsami  $\Delta\tau$  prowadzi do jakościowej ewolucji prawdopodobieństwa przełączania od charakterystycznego kształtu S do histerezy (rysunek 6). Wykazano też, że histereza składa się z gwałtownego skoku w kierunku podgrzewania/schładzania oraz jej powierzchnia silnie wzrasta ze zmniejszeniem  $\Delta\tau$  (rysunek 8). Tego rodzaju zachowanie można interpretować w terminach *przejścia fazowego* zaindukowanego skorelowanym przełączaniem złącza Josephsona wymuszonym niepełną relaksacją podukładu fononowego.

Podsumowując, Habilitant opracował oryginalną metodę termometrii stochastycznej przydatną do badania procesów nierównowagowych realizujących się w nanoskopowych układach fizycznych. Zaletą tej techniki jest możliwość pomiaru dynamicznie zmieniającej się lokalnej temperatury z imponującą rozdzielczością na poziomie nanosekundowym. Układ pomiarowy bazuje na złączach Josephsona dlatego zaproponowana technika w praktyce jest dedykowana do obszaru ultraniskich temperatur, poniżej wartości temperatury krytycznej konwencjonalnych nadprzewodników.

Na prowadzone przez siebie badania dr inż. Michał Zgirski skutecznie pozyskiwał środki finansowe z Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej (w ramach projektów *Homing Plus* oraz *First Team*) i Narodowego Centrum Nauki (w ramach grantu *Sonata Bis-9*) oraz uczestniczył w międzynarodowym projekcie badawczym FP7-REGPOT-2012-2013-1 współfinansowanym przez Unię Europejską z Ministerstwem Nauki Szkolnictwa i Szkolnictwa Wyższego. Pan Zgirski ma wiodący wkład do kilku krajowych patentów: techniki pomiaru temperatury w nierównowagowych procesach termicznych (231182), metody generowania liczb losowych (227546) oraz mikroskopii pomiarów magnetycznych (226304).

Wyrazem uznania dla osiągnięć Habilitanta były wykłady przedstawione przez dra Zgirskiego na zaproszenie w Białymstoku, Jachrance, Poznaniu oraz w Rosji, Niemczech, Finlandii, Izraelu, Belgii i Indiach [w sumie 14 zaproszonych referatów]. Pan Zgirski przedstawiał również regularne wykłady podczas innych międzynarodowych konferencji oraz sesji naukowych. Habilitant uczestniczył w recenzowaniu artykułów przekazywanych do prestiżowych czasopism naukowych, takich jak: *Phys. Rev. Lett.* (5 prac), *Phys. Rev. X Quantum* (2 prace), *Phys. Rev. B* (17 artykułów), *Phys. Rev. Applied* (4 prace), *Phys. Rev. Materials* (2 prace), *Phys. Rev. A* (1 artykuł), *Phys. Rev. Research* (3 prace) oraz *J. Appl. Phys.* (1 artykuł).

Doświadczenie dydaktyczne pana Zgirskiego jest nieco słabiej reprezentowane, co jest uwarunkowane specyfiką zatrudnienia w Instytucie Fizyki PAN. W latach 2011 i 2012 Maciej Zgirski wygłosił cykl pięciu dwugodzinnych wykładów na temat przejawu kwantowej natury obiektów makroskopowych dla studentów piątego roku Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Brał udział w popularyzacji nauki, uczestnicząc w Warsztatach dla Młodych Naukowców (zorganizowanych w 2012 roku w IF PAN) oraz w Pikniku Naukowym Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik (w 2013 roku). Znacznie lepiej wygląda wkład pana Zgirskiego w kształceniu młodej kadry. W dotychczasowej działalności wypromował jedną pracę licencjacką, pięć prac magisterskich i aktualnie sprawuje opiekę naukową nad doktorantem zatrudnionym w ramach pozyskanego projektu badawczego. Sprawował też nadzór nad stypendystą typu *postdoc* zatrudnionym w ramach projektu FNP Sonata Bis-9.

Poza głównym dorobkiem badawczym składającym się na rozprawę habilitacyjną pan Maciej Zgirski był zaangażowany w szereg innych zadań naukowych udokumentowanych publikacjami z okresu po doktoracie. Dotyczyły one m.in. doświadczalnego badania stanów Andreeva na kontaktach z nadprzewodnikami [*Phys. Rev. Lett.* **106**, 257003 (2011)], dyspersyjnej termometrii za pomocą złącza Josephsona sprzężonego z rezonatorem [*Phys. Rev. Applied* **6**, 024005 (2016)], technicznych aspektów wzrostu nanodrutów GaAs [*J. Appl. Phys.* **116**, 063509 (2014)], magnetyzmu indukowanego polem elektrycznym w półprzewodniku azotowym [*Nature Comm.* **7**, 13232 (2016)] oraz poszukiwania źródeł niskoenergetycznych modów w materiałach topologicznych [*Phys. Rev. B* **100**, 041408(R) (2019)].

Na podkreślenie zasługują ponadto technologiczno-inżynierskie osiągnięcia dra Zgirskiego. W Instytucie Fizyki PAN zorganizował on laboratoria z chłodziarkami Triton 400 i Heliox, skonstruował system ich obsługi, nadzorował zakup i opracował system obsługi napyłarki elektronowej z działem jonowym, zorganizował od podstaw zestaw do pomiarów rezonansu ferromagnetycznego cienkich warstw, opracował zestaw doświadczalnego pomiaru prędkości propagacji domen magnetycznych oraz uczestniczył w wielu innych zaawansowanych technicznie przedsięwzięciach.

Uważam, że dr inż. Maciej Zgirski uzyskał szereg cennych wyników w doświadczalnej pracy naukowej z zakresu fizyki ciała stałego. Jego zasadniczym osiągnięciem jest opracowanie oryginalnej metody dynamicznego pomiaru temperatury w oparciu o proces stochastycznego przełączania złącza Josephsona między stanem nadprzewodzącym i dyssypatywnym poprzez serię impulsowych sygnałów prądowych. Habilitant zastosował taki schemat do analizy procesów nierównowagowych zaindukowanych lokalnym podgrzewaniem, empirycznie oszacowując bardzo szybki czas relaksacji podukładu elektronowego. Z powodzeniem wykorzystał także swoją technikę do wiarygodnego generowania liczb losowych oraz modelowania procesów stochastycznych z doświadczalnie kontrolowanym stopniem współkorelacji. Metody te są przydatne nie tylko do termometrii nanoskopowych struktur w zakresie niskich temperatur ale mogą dostarczyć informacji o uniwersalnych cechach innych układów wielociałowych, w tym z uwzględnieniem warunków nierównowagowych. Habilitant jest współautorem około dwudziestu artykułów opublikowanych w poważnych czasopismach naukowych, których oddźwięk w środowisku naukowym (wyrażony cytawalnością) jest znaczący. Reasumując, wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie o nadanie doktorowi Maciejowi Zgirskiemu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.

Jacek Domański