

prof. dr hab. Jacek Sosnowski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
05-400 Świerk, ul. A. Sołtana 7

Recenzja dorobku naukowego i osiągnięcia habilitacyjnego dr inż. Macieja Zgirskiego zatytułowanego: ***Stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali***, wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej IF PAN nr RN/421/6/21/2022 z dn. 05.07.2022 r.

1. Profil działalności naukowej Habilitanta

Pan dr inż. Maciej Zgirski ma bogate doświadczenie i dorobek naukowy, rozwinięty podczas pobytu w szeregu laboratoriach zagranicznych, co umożliwił mu otwarty w ostatnich dekadach system stypendialny wymiany studentów i pracowników naukowych. Habilitant swoją drogę naukową rozpoczął w roku 1998 jako student Wydziału Fizyki, Politechniki Warszawskiej o Specjalizacji Ciała Stałego. Za doskonałe wyniki w nauce dwukrotnie otrzymywał stypendium, w latach 2001-2002 oraz 2002-2003. Studia magisterskie ukończył z wyróżnieniem we wrześniu 2003 r. na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, w kierunku Joniki Ciała Stałego, otrzymując nagrodę FIAT-a w 2003 r. za wykonaną pracę magisterską. Na przełomie lat 2001 – 2002 przez osiem miesięcy uczestniczył w wymianie studenckiej w ramach programu Socrates-Erasmus, dzięki której przebywał na stypendium na Wydziale Fizyki, Uniwersytetu Jyväskylä, w Finlandii. Współpracę z tym Uniwersytetem kontynuował odbywając studia doktoranckie w Nanoscience Center, University of Jyväskylä w Finlandii w latach 2004-2008. W rezultacie tych studiów przygotował i obronił pracę doktorską zatytułowaną: Eksperymentalne badania fluktuacji w ultra-cienkich drutach nadprzewodzących, która rozprawa znajduje się także w internecie pod adresem strony

<https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/18917?locale-attribute=en>. Po doktoracie przebywał przez dwa lata na stanowisku Post Doc, w Quantronics Group, w CEA Saclay we Francji, gdzie zajmował się spektroskopią stanów związanych Andreeva w nadprzewodzącym kontakcie atomowym. Od grudnia 2010 r. dr inż. M. Zgirski zatrudniony jest jako naukowiec w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Laboratorium Kriogeniki i Spintroniki SL2.2. W dalszym ciągu dr inż. M. Zgirski prowadzi także aktywnie międzynarodową współpracę naukową z Uniwersytetem Aalto w Finlandii, gdzie w okresie od lipca do grudnia 2014 r. przebywał w grupie PICO, kierowanej przez prof. Jukka Pekole, w Laboratorium Niskich Temperatur. Realizował w Uniwersytecie Aalto w Finlandii eksperymentalne badania nad budową szybkiego termometru opartego na złączu Josephsona, umieszczonego w nadprzewodzącym rezonatorze koplanarnym i próbkowanym mikrofalami. Także w zeszłym roku przebywał przez dwa miesiące w tym Laboratorium, w ramach European Microkelvin Platform, gdzie realizował autorski projekt: Quasiparticle diffusion and thermal relaxation in Meissner and vortex state.

Ten profil naukowy Habilitanta w skrócie można opisać szeroką gamą słów kluczowych, które obejmują zarówno jego dorobek naukowy, jak też techniczny. Poniżej wybrałem kilka najważniejszych keywordsów: nadprzewodnictwo niskotemperaturowe, złącza Josephsona (JJ), eksperymentalna termodynamika i termometria elektronowa w temperaturach milikelwinowych, nanokalorymetria, wiry w nadprzewodnikach, nanotechnologia w tym litografia elektronowa, testowanie złączy nadprzewodzących i nanodrutów impulsami elektrycznymi.

2. Dorobek naukowo-techniczny, organizacyjny i dydaktyczny Habilitanta w ujęciu ilościowym

Podstawą dorobku naukowego Habilitanta, który stanowi istotę osiągnięcia habilitacyjnego, zgodnie z art. 219, §1 p.2 ustawy z dnia 20.07.2018 r. (Dz.U.2021 poz. 478), jest zespół pięciu publikacji na wspólny temat, wyszczególnionych w następnym punkcie.

Ponadto Habilitant wymienia 6 publikacji, w których jest współautorem i które powstały głównie podczas jego pobytu w zagranicznych ośrodkach naukowych, pięć z nich tematycznie nie wiąże się bezpośrednio z osiągnięciem habilitacyjnym, natomiast jedna związana jest z tematyką habilitacji: M. Zgirski, L. Bretheau, Q. Le Masne, H.

Pothier, D. Esteve, C. Urbina, Evidence for Long-Lived Quasiparticles Trapped in Superconducting Point Contacts, Phys. Rev. Lett. 106, 257003 (2011). Podkreślić należy wysoką rangę tych czasopism, w której Autor przedstawia swoje osiągnięcia naukowe oraz fakt, że publikacje te są wielo-autorskie, osiągając nawet liczbę 14 współautorów. Habilitant w tych publikacjach występuje 5 razy na pierwszym miejscu, przy zachowaniu niealfabetycznej kolejności autorów. To wielo-autorstwo prezentacji osiągnięć naukowych Habilitanta, będących podstawą rozprawy, nasuwa pewne trudności z określeniem realnego, procentowego wkładu Habilitanta w dane osiągnięcie naukowe, gdyż w oświadczeniach współautorów jest tylko informacja, jakie badania wykonywali oni oraz, że nie pisali danego artykułu. Istotnym osiągnięciem może bardziej o znaczeniu technicznym i organizacyjnym Habilitanta jest opracowanie trzech patentów oraz kierowanie czterema polskimi projektami badawczymi i uczestniczenie jako wicelider pakietu sprzętowego w grantie europejskim na kwotę 5 milionów Euro. Za osiągnięcia Habilitanta uzupełniające jego prace naukowo-badawcze uznać można jego działalność dydaktyczną, zarówno w postaci 2 cykli wykładów wygłoszonych na Politechnice Warszawskiej, opiekę nad doktorantem, promotorstwo 4 prac magisterskich, jednej pracy licencjackiej oraz nadzorowanie stażu post-doktorskiego. Habilitant wygłosił również 14 wykładów zaproszonych w krajowych i zagranicznych jednostkach naukowo-badawczych, głównie uniwersytetach oraz 8 wykładów zwykłych. O uznaniu na światowym forum naukowym Habilitanta świadczy zrecenzowanie przez niego 35 artykułów naukowych w renomowanych czasopismach typu Physical Review i Journal of Applied Physics. Znaczące są osiągnięcia Habilitanta dotyczące skompletowania laboratoriów pomiarowych, wyposażonych w unikalną aparaturę, jak dwie skraplarki milikelwinowe, rozcieńczalnikową i sorpcyjną na hel 3. Habilitant prowadził też prace z zakresu popularyzacji nauki, a jego osiągnięcia naukowe zostały docenione poprzez przyznanie mu Nagrody Dyrektora IF PAN za najlepszą publikację w 2016 r. O znaczeniu dorobku naukowego Habilitanta na międzynarodowym forum świadczy wysoka wartość indeksu Hirscha równa 11 według Web of Sciences oraz liczba cytowań wg tego indeksu 580.

3. Osiągnięcie naukowe stanowiące podstawę Wniosku

Dr inż. M. Zgirski jako podstawę wniosku o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego przedstawił osiągnięcie naukowe zatytułowane: **Stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali**, składające się z cyklu pięciu prac wraz z suplementami, opublikowanych w renomowanych czasopismach Phys. Rev. Applied oraz Phys. Rev. B. Są one wyszczególnione poniżej, z zaznaczeniem nazwiska Habilitanta w tym wielo-autorskim zespole.

1. M. Foltyn, **M. Zgirski**, Gambling with Superconducting Fluctuations, Phys. Rev. Applied 4, 024002 (2015)
2. **M. Zgirski**, M. Foltyn, A. Savin, K. Norowski, M. Meschke, J. Pekola, Nanosecond Thermometry with Josephson Junctions, Phys. Rev. Applied 10, 044068 (2018)
3. **M. Zgirski**, M. Foltyn, A. Savin, K. Norowski, Flipping-Coin Experiment to Study Switching in Josephson Junctions and Superconducting Wires, Phys. Rev. Applied 11, 054070 (2019)
4. **M. Zgirski**, M. Foltyn, A. Savin, A. Naumov, K. Norowski, Heat Hunting in a Freezer: Direct Measurement of Quasiparticle Diffusion in Superconducting Nanowire, Phys. Rev. Applied 14, 044024 (2020)
5. **M. Zgirski**, M. Foltyn, A. Savin, K. Norowski, Stochastic thermal feedback in switching measurements of superconducting nanobridge caused by overheated electrons and phonons, Phys. Rev. B 104, 014506 (2021)

Głównym osiągnięciem zawartym w wystąpieniu habilitacyjnym przedstawionym w wyszczególnionych powyżej pracach jest opracowanie oryginalnej metody niskotemperaturowej termometrii elektronowej, która opiera się na pomiarze prawdopodobieństwa przełączania nadprzewodnikowego złącza Josephsona ze stanu nadprzewodzącego do stanu normalnego, pod wpływem impulsów prądowych. Uwzględniony jest wówczas czynnik stochastyczny, natomiast rezultaty tej metody w najbardziej obrazowy sposób pokazane są na wykresie 1 autoreferatu, przygotowanym na podstawie publikacji nr 4. Ponieważ takie przełączanie zależy od temperatury, więc może stanowić podstawę fizyczną działania czujnika temperatury, który pozwala następnie jednoznacznie określić temperaturę elektronów. Istotną zaletą tej metody jest możliwość monitorowania temperatury elektronów w przedziale

czasowym rzędu nanosekund, co szczególnie pomocne jest dla zrozumienia zachodzących szybkozmiennych procesów termicznych w nanoskali. Ta termometria stochastyczna zastosowana została już doświadczalnie w termodynamice ciał mezoskopowych. Przejdźmy obecnie do opisu szczegółowego tego osiągnięcia habilitacyjnego zawartego w pięciu załączonych publikacjach.

W pracy 1 Autorzy rozpatrywali możliwości przejścia wskutek fluktuacji termicznych lub kwantowych do stanu normalnego złącz Josephsona i nadprzewodnikowych nanodrutów, w stanie bliskim warunków krytycznych, powstałych głównie pod wpływem przepływu prądu. Ponieważ efekt ten jest w pełni stochastyczny, więc zaproponowano zastosowanie go do generowania liczb losowych oraz zbadano możliwości wykorzystania złącz Josephsona jako narzędzia do stochastycznego wyznaczania parametrów fizycznych, takich jak strumień magnetyczny, temperatura i prąd. W pracy 2 Autorzy przedstawili nową ideę termometrii w nanoskali, wykorzystując pomiary przełączania ze stanu nadprzewodzącego do normalnego słabego złącza, zasilanego nanosekundowymi impulsami prądowymi. Ze względu na szybką dynamikę złącza można uzyskać w ten sposób bezprecedensową rozdzielczość czasową rzędu 10 nano-sekund. Skonstruowany na tej podstawie termometr służyć może, jak przekonują Autorzy do pomiaru dynamicznej temperatury elektronów. W artykule 3 zbadano stochastyczny charakter przełączania ze stanu nadprzewodzącego do stabilnego stanu rezystywnego słabego złącza nadprzewodnikowego i nanodrutu pod wpływem prądu elektrycznego. Zbadano prawdopodobieństwo przełączania, tzw. krzywą S. Praca ta dotyczy kryterium niezależnego przełączania, które jest ważne dla wiarygodności pomiarów łączeniowych przewodów nadprzewodzących i różnego rodzaju złącz Josephsona oraz traktuje złącza Josephsona jako „monetę elektryczną” ze strojonym prądowo prawdopodobieństwem przełączenia. Artykuł 4 poświęcony jest propagacji i relaksacji nierównowagowych quasicząstek w nadprzewodnikach, co ma fundamentalne znaczenie dla funkcjonowanie wielu urządzeń w nanoskali. Autorzy badają jak quasicząstki ogrzane powyżej temperatury sieci mogą relaksować się lokalnie przez oddziaływanie z fononem lub emisję fotonów oraz rozpraszają się na znaczne odległości w nanostrukturze. Za pomocą nanotermometrii elektronicznej, opartej na sondowaniu zależnym od temperatury, prądem przełączania nadprzewodzącego nanomostka, Autorzy wskazują na możliwość monitorowania przenoszonego impulsu

ciepłego przez strumień nierównowagowych quasicząstek z rozdzielczością czasową rzędu 1 ns. Pomiar daje obraz dyfuzji quasicząstek w nadprzewodzącą taśmę aluminiową i pozwala na bezpośrednie wyznaczenie stałej dyfuzji $D = 100 \text{ cm}^2/\text{s}$. W artykule 5 badane były skorelowane przełączenia nadprzewodzącego nano-mostka zasilanego ciągiem impulsów prądowych, prowadzących do przegrzania elektronów i fononów. W przypadku impulsów o niskiej częstotliwości powtarzania pojedynczy impuls prowadzi do przejścia mostka nadprzewodzącego do stanu normalnego z prawdopodobieństwem niezależnym od wyników uzyskanych w poprzedzających impulsach. Natomiast przy skróceniu odstępu czasu między impulsami występuje długo-zakresowa korelacja między impulsami, w której stochastyczne przełączenie w jednym impulsie podnosi temperaturę mostka i wpływa na wynik sondowania w następnych impulsach. W rezultacie sztuczny skomplikowany proces stochastyczny z regulowaną siłą korelacji jest wytworzony, który ze względu na dużą wrażliwość na badany parametr, jakim jest prąd elektryczny, temperatura lub pole magnetyczne, umożliwia jego bardzo czułą detekcję.

Reasumując w publikacji 1 Autor dyskutuje probabilistyczny charakter włączeń nadprzewodzącego mostka i pokazuje analogię z generowaniem liczb losowych. Praca 2 poświęcona jest przedstawieniu metody pomiaru gwałtownie zmieniającej się temperatury elektronów w nadprzewodzącym nanodrutach, natomiast artykuły 3 i 5 poświęcone są pomiarowi czasów relaksacji termicznej w mocno podgrzanej nanostrukturze nadprzewodzącej doprowadzonej do silnej nierównowagi termicznej. W pracy 4 Habilitant z kolei przedstawił rezultaty bezpośredniego pomiaru dyfuzji quasicząstek w nadprzewodzącym aluminium.

Opracowana przez Habilitanta termometria umożliwia prowadzenie nowatorskich badań w obszarze termodynamiki niskotemperaturowych układów kwantowych i nanoskopowych. Pozwala prowadzić badania mechanizmów relaksacji ciepła w przypadku występowania sprzężenia elektronów z fononami, dyfuzji gorących elektronów, a także emisji i absorpcji fotonów. Opracowaną metodę termometrii elektronów Habilitant proponuje także użyć do badania relaksacji energii na granicy nanostruktury z podłożem oraz do analizy propagacji fononów w podłożu.

Habilitant przewiduje także stosując tę metodę obserwować dyfuzję gorących elektronów w nanostrukturach oraz prowadzić kalorymetryczne zliczanie fotonów mikrofalowych. Istotny jest tutaj zakres mikrofalowy, gdyż jeśli chodzi o fotony

optyczne, to takie detektory nadprzewodnikowe istnieją już od kilkudziesięciu lat. Jak przekonuje Habilitant opracowana przez niego metoda może być także stosowana w nanokalorytronice, nowym obszarze nauki, poświęconym generowaniu i operacji prądami cieplnymi w nowoczesnych przyrządach.

O wysokiej ocenie osiągnięć Habilitanta świadczą także pozytywne opinie recenzentów jego publikacji w renomowanych czasopismach z najwyższej półki, o wysokim Impact Factor, przede wszystkim pięć publikacji wymienionych powyżej stanowiących podstawę wniosku habilitacyjnego. Osiągnięcia Habilitanta docenione zostały także przyznaniem mu szeregu grantów krajowych z Funduszu Nauki Polskiej i Narodowego Centrum Nauki, na łączną kwotę rzędu 7 milionów złotych. Podkreślić też należy siedmioletni pobyt Habilitanta w zagranicznych ośrodkach naukowych, w których podnosił swoje kwalifikacje i zdobywał nowe doświadczenia zawodowe.

Z obowiązku recenzenta pozwalam sobie zgłosić kilka uwag krytycznych. Wyznaczanie temperatury na podstawie analizy danych dla różnych impulsów prądów przełączania (temperatura z prądu przełączania) lub metodą temperatury z prawdopodobieństwa, jak skrótowo nazywa to Habilitant nie jest bezpośrednią metodą, lecz wtórną opartą na pewnym modelu obliczeniowym, co może prowadzić do pewnych dowolności związanych z interpretacją wyników. Może to też utrudnić szersze zastosowanie tej metody pomiaru temperatury i tak ograniczonej do milikelwinowych temperatur. Jak widać na rys. 1 autoreferatu i rys. 4 publikacji 4, model numeryczny 1D przepływu ciepła nie całkiem pokrywa się z danymi eksperymentalnymi, co może wraz z szumami termicznymi ograniczać dokładność wyznaczenie w taki pośredni sposób temperatury. Może celowe byłoby porównanie wyników pomiaru temperatury uzyskanych obydwoma metodami, co pozwoliłoby na lepszą orientację w zgodności stosowania metody pomiaru temperatury z prądów przełączania oraz metody temperatury z prawdopodobieństwa. Odczuwa się we wniosku habilitacyjnym pewien brak konkretnych zrealizowanych aplikacji tej nowej termometrii, natomiast duża uwaga skoncentrowana jest na jej perspektywach. Czy poza złączami aluminiowymi badano też inne złącza. Autor podkreśla nowatorstwo opracowanej przez siebie metody termometrii stochastycznej, opartej na złączach Josephsona i mostkach Dayema, znanych już od około pół wieku, więc nasuwa się pytanie czy tego typu badania nie były dotychczas prowadzone. Omawiając koncepcję termometru stochastycznego dobrze byłoby określić jaki zakres temperaturowy on obejmuje, gdyż aluminium ma temperaturę

krytyczna tylko około 1,2 K. Dla uogólnienia rezultatów metody dobrze byłoby więc przeprowadzić pomiary na innych złączach Josephsona np. niobowych o znacznie wyższych temperaturach krytycznych lub wykonanych z wysokotemperaturowych nadprzewodników, z których produkuje się już SQUID-y. Ponieważ w osiągnięciu habilitacyjnym eksponuje się zagadnienia termometrii, więc może dobrze byłoby dokonać porównania tej nowej metody z parametrami istniejących niezależnie nano-detektorów nadprzewodnikowych, czułych nawet na pojedyncze fotony. Polecam na przykład opracowaną przez nas Polską Normę PN-EN 61788-22-1 Nadprzewodnictwo Część 22-1: Nadprzewodnikowe urządzenia elektroniczne, Ogólna specyfikacja dla czujników i detektorów. Wyszczególniono w niej nano-detektory czułe zarówno na gorące elektrony, jak też pracujące w obszarze teraherców i mikrofal, takie jak Detektor Mikrofalowej Indukcyjności Kinetycznej Fotonowy (MKIPD), Nadprzewodnikowy Bolometr Gorącego Elektronu Mikser Terahercowy (SHEBTM), czy też detektory fotonowe jak Nadprzewodnikowy Bolometr Fotonowy Gorącego Elektronu (SHEBPD).

W punkcie 1.5 autoreferatu w drugim wzorze pojawia się symbol wariacji zamiast pochodnej, symbol r jest interpretowany jako opór jednostki objętości, co w inżynierskim słownictwie określa się jako rezystywność, a w fizycznym oporność właściwa, symbole T_e temperatura elektronów oraz A przekrój przy tym wzorze nie są wyjaśnione. W bilansie cieplnym, może dobrze byłoby dodać element opisujący chłodzenie, szczególnie, że w suplementach do artykułów 2 i 4 są te sprawy badane, natomiast sugerowałbym także bilans cieplny uzupełnić oddziaływaniem gorących elektronów z parami Coopera, co de facto jest istotą obserwowanych zjawisk. Nie wiem także, na ile założenie przepływu ciepła jednowymiarowe jest w tym przypadku wystarczające, gdyż wydaje się, że następuje także wymiana ciepła przez powierzchnię. W podpisach pod rysunkami autoreferatu pojawiają się oznaczenia Rys, a w innych miejscach Fig. Nasuwa się też pytanie, w jakim stopniu obydwie skraplarki ultraniskotemperaturowe, rozcieńczalnikowa Triton 400 i chłodziarka sorpcyjna He^3 Heliox niezbędne były do przeprowadzenia przez Habilitanta badań tej nowej termometrii elektronowej, szczególnie, że wydaje mi się, że takie skraplarki budowane już były od lat w IF PAN. Przykład skraplarek oraz budowa skomplikowanych ultraniskotemperaturowych urządzeń pomiarowych wskazuje jednocześnie na interdyscyplinarny charakter osiągnięcia habilitacyjnego, gdyż konstrukcję pewnych

zaawansowanych elementów układu pomiarowego, można zakwalifikować do rezultatów także z zakresu elektroniki.

W słowach kluczowych autoreferatu pojawia się nazwa wiry nadprzewodzące. Jestem zdania, że należy używać sformułowania wir, sieć wirów, jak wskazują na to hasła 815-01-16 i 815-01-17 opracowanej przez nas polskiej normy PN-IEC 60050-815 Międzynarodowy słownik terminologiczny elektryki Część 815: Nadprzewodnictwo, z kolejnymi zmianami w poszczególnych edycjach. Słownik ten jest zgodny z normą międzynarodową IEC 60050-815 International Electrotechnical Vocabulary Superconductivity. Wiry właśnie nie są nadprzewodzące, ponieważ ich rdzeń jest w stanie normalnym, przenosząc skwantowany strumień magnetyczny, Ew. skłaniałbym się do sformułowania wiry magnetyczne w nadprzewodnikach.

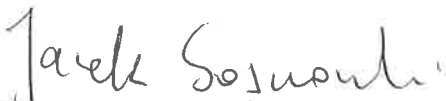
4. Uwagi końcowe i ocena Wniosku habilitacyjnego

Przedstawiona w osiągnięciu habilitacyjnym, którego podstawę stanowi pięć załączonych publikacji, opracowana przez Habilitanta nowa metoda termometrii elektronowej zasługuje na uznanie jej za materiał spełniający wymagania dotyczące osiągnięć habilitacyjnych zgodnie z obowiązującą Ustawą. W tym uzasadnieniu oceny działalności naukowej Habilitanta przedstawionej w osiągnięciu habilitacyjnym zaznaczyć należy, że wniosek przygotowany został w sposób staranny i kompleksowy. Również wysoko ocenić należy dorobek naukowy Habilitanta zarówno od strony ilościowej, jak też biorąc pod uwagę wysoki impact factor czasopism, w których publikuje Habilitant i udział w konferencjach z zaproszonymi wykładami i własnymi oryginalnymi prezentacjami, a także przyznanie mu szeregu projektów badawczych. O osiągnięciach Habilitanta wskazuje także jego współpraca z europejskimi laboratoriami niskotemperaturowymi, w których przebywał przez siedem lat.

Upoważnia to recenzenta do poparcia wniosku o nadanie dr inż. M. Zgirskiemu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie fizyka.

Reasumując, doceniam wysoki poziom naukowy przedstawionego mi do zrecenzowania osiągnięcia naukowego Habilitanta, dodatkowo uwzględniając wysoką aktywność Habilitanta we współpracy międzynarodowej oraz na polu pozyskiwania projektów badawczych, a także duży dorobek publikacyjny w renomowanych

czasopismach, poparty wysoką wartością indeksu Hirscha i liczby cytowań. Upoważnia to recenzenta do stwierdzenia, że powyższe osiągnięcie habilitacyjne spełnia wymagania obowiązującej Ustawy z dn. 20 lipca 2018 roku: Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce w zakresie wymagań stawianych rozprawom habilitacyjnym. Na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie przez Radę Naukową Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie dr inż. M. Zgirskiego, autora osiągnięcia habilitacyjnego zatytułowanego: **Stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali**, do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie nauk fizycznych.


prof. dr hab. Jacek Sosnowski

Warszawa, 23 sierpnia 2022 r.