

Kraków, 15 stycznia 2026

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Dibyendu Kuiri’ego pt.
“Electronic transport and topological superconductivity in
nanoscopic Josephson junctions”**

Recenzowana rozprawa doktorska została wykonana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo–Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, a jej promotorem jest dr hab. inż. Michał P. Nowak, prof. AGH. Rozprawa liczy 100 stron (w tym 14 numerowanych osobno, a zawierających podziękowania, streszczenia w językach angielskim i polskim, oraz spis treści) i jest podzielona na 8 rozdziałów, z których trzy pierwsze (liczące łącznie 32 strony) zawierają informacje wprowadzające, w tym krótki opis zjawisk fizycznych dyskutowanych w pracy a także opisy formalizmu Landauera-Büttikera oraz metod numerycznych stosowanych w badaniach transportu kwantowego; rozdział 4. (4 strony) zawiera krótkie omówienia wyników trzech artykułów naukowych stanowiących zasadniczą część rozprawy; 3 kolejne rozdziały (razem 44 strony) to pełnotekstowe odbitki wspomnianych artykułów; całość zamyka dwustronicowe podsumowanie oraz liczący 87 pozycji spis literatury cytowanej w rozdziałach 1.–3. Doktorant jest pierwszym autorem 2 artykułów opublikowanych w latach 2023 i 2025 *Physical Review B*, oraz współautorem pracy doświadczalnej opublikowanej w roku 2022 w *Nano Letters*.

Tematyka badań opisanych w doktoracie koncentruje się wokół zagadnień występowania stanów zerowych Majorany, i możliwości manipulacji nimi, w układach elektronicznych zawierających doprowadzenia nadprzewodzące. Takie stany mogą pojawiać się na krawędziach jedno– lub dwuwymiarowego półprzewodnika z silnym sprzężeniem spin-orbita (ang. *spin-orbit coupling* — SOC), w którym

nadprzewodnictwo (typu s) indukowane jest przez efekty bliskości, a dodatkowo styczne pole magnetyczne wprowadza układ w fazę topologiczną.

W doświadczalnej pracy zbiorowej [Moehle i in., *Nano Lett.* **22**, 8601 (2022)], która włączona jest do rozprawy jako pierwsza, Doktorant odpowiadał za konstrukcję modelu teoretycznego opisującego stany związane typu Andreeva na przeciwległych krawędziach złącza Josephsona (w geometrii: nadprzewodnik — półprzewodnik z SOC — nadprzewodnik). Wspomniany model umożliwił w szczególności zadowalające zrozumienie ewolucji kształtu przestrzennego funkcji falowych dla stanów brzegowych, sprzężenia pomiędzy nimi, jak również ewolucji prądu krytycznego dla układu jako funkcji pola magnetycznego.

Zagadnienie ewolucji stanów związanych w złączu Josephsona ze wzrostem pola magnetycznego było badane bardziej szczegółowo w drugiej pracy [Kuiiri i in., *Phys. Rev. B* **108**, 205405 (2023)] włączonej do rozprawy. Pokazano tam, że wzrost pola magnetycznego (stycznego do płaszczyzny złącza) wprowadza układ w fazę topologiczną, a przejście do tej fazy związane jest ze zmianą parzystości, co może zostać wykryte w doświadczeniu jako zmiana znaku nielokalnego przewodnictwa dla zerowej energii. W tej samej pracy przedyskutowano również ograniczenia praktyczne detekcji stanów topologicznie nietrywialnych w układzie ze złączem Josephsona: różnica faz na złączu zazwyczaj powiązana jest ze strumieniem przez pętlę nadprzewodzącą o niezerowej indukcyjności, co uniemożliwia dostęp do niektórych obszarów przestrzeni parametrów sterujących (różnica faz – pole magnetyczne). W efekcie, detekcja faz topologicznych wymaga zastosowania stosunkowo silnych pól magnetycznych, które z kolei mogą niszczyć nadprzewodnictwo. Staranny dobór geometrii układu jest zatem sprawą kluczową dla obserwacji rozważanych zjawisk.

Ostatnia praca [Kuiiri i in., *Phys. Rev. B* **111**, 085416 (2025)] włączona do rozprawy poświęcona jest analizie stanów topologicznych w długim złączu, tj. takim, dla którego długość jest porównywalna (lub przewyższa) długość koherencji w nadprzewodniku. Pokazano teoretycznie, że dla takiej konfiguracji obszary topologicznie nietrywialne w przestrzeni parametrów sterujących powiększają się znacząco (rosnąc w przybliżeniu liniowo) ze wzrostem długości złącza, a zarazem maleje wartość pola konieczna dla detekcji interesujących efektów.

Nie ulega wątpliwości, że doktorant opanował biegle metody analityczne i numeryczne umożliwiające badania stanów kwantowych w układach zawierających elementy nadprzewodzące i półprzewodniki ze sprzężeniem spin-orbita, w tym

stosowanie pakietu oprogramowania KWANT do obliczeń charakterystyk transportowych. Umożliwiło to otrzymanie szeregu (omówionych skrótowo powyżej) wartościowych wyników naukowych, które wpisują się w istotny nurt badań podstawowych mających na celu wskazanie nowych platform fizycznych dla realizacji bitów kwantowych (kubitów). Chociaż urządzenia realizujące kubity w oparciu o zjawisko Josephsona są już dostępne komercyjnie, dla poprawnego działania wymagają chłodzenia do temperatur milikelwinowych, co mocno ogranicza powszechność ich stosowania. Kubity oparte na stanach topologicznych wydają się zatem obiecującą alternatywą dla już istniejących, chociaż stopień zaawansowania badań jest zdecydowanie mniejszy niż chociażby w przypadku badanych od około dwudziestu lat kubitów fazowych i fluxonowych.

W ocenie rozprawy — z obowiązku recenzenta — wymienię teraz kilka niedoskonałości, głównie o charakterze redakcyjnym.

— Rozdziały 1.–3., zawierające informacje wprowadzające, są silnie niejednolite jeśli chodzi o szczegółowość wywodu. W szczególności, w Rozdziale 1. brakuje funkcji wariacyjnej BSC, przydałoby się także — choćby skrótowe — wyprowadzenie równania Josephsona. (W zestawieniu ze szczegółowym wyprowadzeniem wzoru Landauera–Büttikera w rozdziale następnym, takie podejście wydaje się mało konsekwentne.)

— Porównując Rysunki 1.4 i 1.6 nasuwa się pytanie, ile wynosi wartość pola B_c ?

— Czy możliwe jest oszacowanie głębokości wnikanía pola magnetycznego do elementów nadprzewodzących pokazanych na Rysunku 1.5; jak zjawisko wnikanía pola może wpływać na wielkości mierzone w eksperymencie?

— W Rozdziale 2. założenie, że kwazipęd $k = 0$ [patrz wzór (2.3)] odpowiada minimum energii jest słuszne dla typowych relacji dyspersji, nie jest jednak konieczne dla przeprowadzenia wywodu.

— Dalej, w równaniu (2.10) i następnych, niepotrzebnie założono, że wartość transmisji $T(E)$ jest taka sama dla wszystkich kanałów.

— Przy wzorze (2.28) zawierającym amplitudy odbicia i transmisji (r i t) nie wyjaśniono, że mogą one być macierzami.

— Ostatnie z równań (2.30) pojawia się w zasadzie znikąd, gdyż sumowanie po otwartych kanałach nie było wcześniej wprowadzone.

— W rozdziale 3., opisującym pakiet oprogramowania KWANT, wartołoby dokładniej objaśnić koncepcję efektywnego układu z jedną elektrodą, gdyż jest ona w pierwszej chwili nieco zaskakująca.

— Na s.32, poniżej wzoru (3.22), zamiast słowa “flux” prawdopodobnie powinno być “charge” lub “current”.

— Po wzorze (3.23) warto podać jawne wzory na współczynniki A i B dla przypadku łańcucha, gdyż nie będą one szczególnie skomplikowane.

Podsumowując, doktorant bez wątpienia wykazał się dobrą znajomością aktualnych zagadnień fizyki układów nanoskopowych oraz opanował narzędzia obliczeniowe niezbędne do prowadzenia badań teoretycznych w tej dziedzinie. Chociaż dorobek publikacyjny doktoranta nie jest bardzo obszerny, włączone do rozprawy artykuły zawierają ważne wyniki naukowe, które mogą mieć spory wpływ na rozwój badań stanów związanych typu Majorany w układach nadprzewodzących. Jestem przekonany, że **przedłożona mi do oceny rozprawa spełnia wszelkie wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę zatem o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.**



Prof. Adam Rycerz