

Dr hab. Małgorzata Samsel-Czekała, prof. INTiBS PAN

Oddział Teorii Materii Skondensowanej,

tel.: +48 71 3954 322

e-mail: m.samsel@intibs.pl

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych

im. Włodzimierza Trzebiatowskiego Polskiej Akademii Nauk

ul. Okólna 2, 50-422 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Aksela Kobialki

pt.: „Emergence and nonlocality of Majorana bound states in nanoscopic systems”

(Emergencja i nielokalność stanów związanych Majorany w układach nanoskopowych)

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pana mgr. inż. Aksela Kobialki, pt.: „*Emergence and nonlocality of Majorana bound states in nanoscopic systems*” (*Emergencja i nielokalność stanów związanych Majorany w układach nanoskopowych*), została przygotowana w ciągu 5 lat, podczas studiów doktoranckich w Instytucie Fizyki na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej (UMCS) w Lublinie. Doktorant wykonał ją pod kierunkiem Promotora prof. dr. hab. Tadeusza Domańskiego z Katedry Fizyki Teoretycznej Instytutu Fizyki UMCS oraz Promotora pomocniczego dr. hab. Andrzeja Ptoka, prof. IFJ PAN w Krakowie.

Dysertacja, opracowana w j. angielskim, ma charakter teoretyczny i stanowi spójny zbiór 9 publikacji z lat 2017-2021, z dołączonymi podziękowaniami, streszczeniem i obszernym przewodnikiem po publikacjach (w sumie 85 stron). Łącznie z reprintami publikacji obejmuje aż 186 stron, podzielonych na 6 rozdziałów, z których cztery pierwsze są zasadnicze i zakończone odrębnymi wykazami bibliografii, zawierającymi sumarycznie aż 273 trafnie dobrane pozycje. Przewodnik został napisany w bardzo dobrym stylu i ma przejrzystą strukturę z logicznym podziałem na rozdziały.

W Rozdziale 1 („*Introduction*”) przedstawione jest klarowne i zwięzłe wprowadzenie do tematyki doktoratu (34 strony), poświęconej teoretycznym badaniom nadprzewodnictwa w wybranych układach nanoskopowych, w których mogą pojawiać się obszary tzw. wyspy nadprzewodnictwa topologicznego ze stanami brzegowymi w postaci egzotycznych kwazicząstek Majorany, będących własnymi antycząstkami. W kolejnych podrozdziałach ukazany jest rys historyczny ewolucji podstawowych pojęć egzotycznych stanów kwantowych, w szczególności tytułowych nietrywialnych stanów związanych Majorany (*Majorana bound states*, MBS) w porównaniu

z trywialnymi stanami związanymi Andreewa, wzbudzonymi w przerwie nadprzewodników jako kwazicząstki Bogoliubova. Następnie ukazane są obiecujące perspektywy wykorzystania MBS jako nieabelowych enionów o nielokalnej naturze do realizacji komputerów kwantowych, odpornych na dekoherencję, w celu osiągnięcia tzw. supremacji kwantowej. Bardzo ciekawy jest również przegląd kilku kluczowych publikacji eksperymentalnych z ostatnich lat, wskazujących na możliwą realizację stanów Majorany m.in. w nanoskopowych hybrydach nadprzewodnik-półprzewodnik, w nanodrutach na podłożu z nadprzewodnika czy też nanodrutach połączonych z kropką kwantową, umieszczonych w polu magnetycznym. Na końcu rozdziału Doktorant podał motywację do przeprowadzenia systematycznych badań w ramach niniejszej rozprawy, jaką jest rozpoznanie możliwości kontroli emergencji i nielokalności MBS w układach o różnej geometrii za pomocą wybranych parametrów w celu jej wykorzystania do manipulacji stanami kwantowymi, niezbędnej w obliczeniach z użyciem przyszłych komputerów kwantowych. Tematyka ta jest ostatnio niezwykle aktualna i wzbudza ogromne zainteresowanie zarówno w wiodących ośrodkach naukowych jak i firmach informatycznych ze względu na wyścig w poszukiwaniu nowych technologii konstrukcji komputerów kwantowych, które mają przynieść rewolucyjne rozwiązanie szeregu problemów współczesnej cywilizacji.

Tutaj mam następującą uwagę. Ponieważ ten rozdział jak i kolejne zawiera szereg skrótów, z których nie wszystkie zostały wyjaśnione w przewodniku (np. MQPs na str. 4), dlatego pomocny byłby skorowidz skrótów używanych w całej rozprawie, którego niestety zabrakło.

Rozdział 2 („*Theoretical essentials*”) rozprawy, liczący 20 stron, zawiera w kolejnych podrozdziałach adekwatny opis podstaw teoretycznych metodologii, stosowanej w recenzowanej dysertacji, w szczególności formalizmu równań Bogoliubova-de Gennesa (BdG). Okazuje się, że w ramach tego formalizmu, używanego m.in. do opisu trywialnych stanów wzbudzonych kwazicząstek Bogoliubova w nadprzewodnikach, samosprężone stany związane Majorany o zerowej energii można traktować jak szczególną wersję kwazicząstek Bogoliubova. Warunkiem koniecznym pojawienia się takich stanów jest przejście topologiczne, w szczególności pod wpływem pola magnetycznego, z trywialnej do nietrywialnej fazy nadprzewodnika, związane z zamknięciem i ponownym otwarciem przerwy nadprzewodzącej. Doktorant podaje także przykłady dwóch modeli, których rozwiązania dopuszczają istnienie MBS. Należy do nich model Kitaeva jednowymiarowego łańcucha bezspinowych fermionów jak również rozpatrywany w rozprawie model nanodrutu z oddziaływaniem Rashby (prostopadłym do nanodrutu), przy czym taki nanodrut posiada stany brzegowe (zaburzające jego periodyczność). Natomiast przyłożone wzdłuż nanodrutu pole magnetyczne, indukuje fazę nietrywialną topologicznie. W takim układzie otwiera się przerwa nadprzewodząca jako efekt bliskości klasycznego nadprzewodnika, z którego pary Coopera mogą do niego tunelować. Model Rashby nanodrutu może być zmodyfikowany przez jego dimeryzację (typu Su-Schrieffer-Heegera, SSH) lub uporządkowanie antyferromagnetyczne podłoża. W kolejnym podrozdziale Doktorant rozważa istotne w rozprawie zagadnienie nielokalności związanych stanów

Majorany, która jest konsekwencją delokalizacji takich par kwazicząstek, pochodzących z nietrywialnych topologicznie brzegów układu, które mogą być traktowane jak splątane kwantowo, zdegenerowane stany o zerowej energii i wykorzystane do obliczeń kwantowych. Nielokalność stanów Majorany może także prowadzić do nietrywialnych zjawisk, takich jak teleportacja czy anomalny transport, bądź też do ich niekorzystnego wnikania do trywialnych obszarów układu. Następnie Autor definiuje wskaźniki nietrywialności topologicznej układu, tzw. niezmienniki topologiczne, używane w zakresie fizyki fazy skondensowanej, oraz ich klasyfikacje, a wreszcie określa nieabelową statystykę kwazicząstek Majorany, kluczową dla konstrukcji komputerów kwantowych.

W Rozdziale 3 („*Theoretical and numerical approach*”) dysertacji na 14 stronach zamieszczony jest opis metod teoretycznych i numerycznych, opracowanych i użytych przed Doktoranta, dzięki którym uzyskał wyniki prezentowane w ocenianym cyklu 9 publikacji. Znajdujemy w nim m.in. wyprowadzenie równań Bogoliubova-de Gennesa w ramach parametryzacji modelu ciasnego wiązania, transformację kanoniczną Bogoliubova-Valatina, prowadzącą do otrzymania macierzowej postaci równań BdG, definicje wyznaczanych lokalnych gęstości stanów, a także odpowiednich niezmienników topologicznych, takich jak Pfaffian czy liczba nawojowa (*winding number*). Wreszcie zamieszczony jest schemat algorytmu obliczeń numerycznych, w którym jako dane wejściowe wprowadza się parametry związane z wielkościami fizycznymi, takimi jak potencjał chemiczny, pole magnetyczne, sprzężenie spinowo-orbitalne czy parametr porządku nadprzewodnika. Dla zadanych parametrów konstruowany jest Hamiltonian dla układu równań BdG w postaci macierzowej, który jest następnie diagonalizowany w celu uzyskania wektorów i wartości własnych, z których wyznaczane są obserwabla (lokalne gęstości stanów, wagi funkcji spektralnych). Większość tych obliczeń została wykonana z użyciem kodu Fortran90 a niewielka ich część także z wykorzystaniem pakietu KWANT w Pythonie, przy czym diagonalizacja Hamiltonianu w Fortanie90 została wykonana z użyciem bibliotek LAPACK/MKL.

Rozdział 4 („*Cumulative contribution of author*”) rozprawy o objętości 114 stron jest kluczowy i obejmuje reprints 9 oryginalnych publikacji cyklu [1-9], dokumentujących wszystkie wyniki badań Doktoranta w ramach recenzowanej rozprawy, poprzedzone krótkimi ich streszczeniami oraz określeniem indywidualnego wkładu Doktoranta. Rozdział podzielony został na dwie części, odpowiadające tytułowi rozprawy. Pierwsza część, obejmująca publikacje [1-4], dotyczy emergencji a druga, publikacje [5-9], nielokalności stanów związanych Majorany.

Artykuły [1-9], opisujące systematycznie oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, zostały opublikowane w międzynarodowych recenzowanych czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR) na podstawie *Web of Science* (WoS). Aż 7 z nich [1-5,8,9] ukazało się w czasopismach o wysokiej randze naukowej, posiadających znaczące współczynniki wpływu, tzw. *impact factors* (IF): w tym 5 w *Physical Review B* (IF ~ 4,0) oraz po jednej w *Scientific Reports* (IF ~ 4,0) i *Journal of Physics - Condensed Matter* (IF ~ 2,7). Natomiast dwie pozostałe [6,7] zostały wydane jako artykuły

pokonferencyjne w Acta Physica Polonica A z niższym IF $\sim 0,6$. Sumaryczny współczynnik wpływu wszystkich 9 publikacji IF $\sim 27,8$ jest również wysoki, co daje średni IF $\sim 3,1$ na publikację. Wszystkie publikacje, a zwłaszcza te ocenione już przez wymagających recenzentów ww. wiodących czasopism naukowych z fizyki, zawierają analizę bardzo wartościowych wyników oraz spełniają najwyższe standardy zarówno pod względem poziomu merytorycznego jak i edytorskiego, w tym szaty graficznej. Natomiast sumaryczna liczba cytowań ww. 9 publikacji pod koniec sierpnia 2021 r. w bazie WoS wynosiła aż 87, w tym największe uznanie w środowisku naukowym zdobyła publikacja [5] A. Ptoka, A. Kobińska, T. Domański, *Controlling the bound states in a quantum-dot hybrid nanowire*, Phys. Rev. B **96**, 195430 (2017), która była cytowana 55 razy.

Wszystkie publikacje z ww. cyklu są wieloautorskie, przy czym na każdą z nich przypada średnio 3,3 współautora, w tym jeden lub dwóch Promotorów. Jednak należy podkreślić, że Doktorant jest pierwszym współautorem w aż 7 z publikacjach [1-4,6-8], co świadczy o jego wiodącej roli w powstawaniu tych prac. Przesłane razem z rozprawą doktorską oświadczenia współautorów, którzy są wybitnymi fizykami teoretykami, w szczególności obu Promotorów oraz profesorów Andrzeja M. Olesia, Macieja Maśki i Przemysława Piekarza, spójne z oświadczeniami Doktoranta w rozprawie, wskazują na całkowity lub dominujący udział mgr. inż. Aksela Kobińskiego w przygotowaniu i przeprowadzaniu obliczeń numerycznych, opracowaniu i wizualizacji wyników. Bliżej niesprecyzowana część obliczeń numerycznych i analitycznych, których wyniki są prezentowane w 6 publikacjach, została wykonana przez Promotora pomocniczego prof. Andrzeja Ptoka, który i tak podkreśla dużą samodzielność Doktoranta. Natomiast prof. Maśka przeprowadził pewne obliczenia, aby określić rolę nieporządku w układzie analizowanym w publikacji [1]. Wreszcie dr Szczepan Głodzik obliczył numeryczne wartości natężeń prądu, przedstawionych na Rys. 9 w publikacji [9]. Oświadczenia współautorów i Doktoranta wskazują także na jego istotną rolę w analizie i dyskusji wyników oraz redagowaniu manuskryptów i odpowiedzi recenzentom. Niestety nie dostarczono mi oświadczeń dr. hab. Nicholasa Sedlmayra, współautora publikacji [1,2], oraz Davida J. Alspaugh'a i prof. Pascala Simona, współautorów publikacji [9], co jednak nie ma większego wpływu na określenie charakteru wkładu Doktoranta w tych pracach.

Do najważniejszych osiągnięć mgr. inż. Aksela Kobińskiego w ramach niniejszej rozprawy zaliczyłabym przede wszystkim uzyskane wyniki wspomnianej powyżej publikacji [5] o najwyższej liczbie cytowań. Autorzy zbadali w niej proces tworzenia się (w silnym polu magnetycznym) i wnikania stanów związanych Majorany do nienadprzewodzących obszarów kropki kwantowej, przyłączonych do jednowymiarowego nadprzewodnika topologicznego (nanodrutu), inspirować się układem eksperymentalnym z publikacji Science **354**, 1557 (2016) i zaproponowali bardziej uogólnione nanourządzenie, w którym można by kontrolować pojawianie się i znikanie MBS napięciem na brankach układu kropek kwantowych.

Drugim ważnym osiągnięciem są w mojej ocenie wyniki przedstawione w publikacji [3] A. Kobińska i A. Ptak, *Electrostatic formation of the Majorana quasiparticles in the quantum dot-nanoring structure*, J. Phys.: Condens. Matter **31**, 185302 (2019), w której Autorzy pokazali, jak można kontrolować proces powstawania i tzw. kotwiczenia kwazicząstek Majorany na odpowiednio modulowanym przestrzennie potencjale elektrostatycznym w układzie nanopierścienia sprzężonego z kropką kwantową, w ramach zaproponowanego zmodyfikowanego modelu łańcucha z oddziaływaniem Rashby.

Jako trzecie najważniejsze osiągnięcie proponuję uznać wyniki, zamieszczone w publikacji [8] A. Kobińska, T. Domański i A. Ptak, *Delocalization of Majorana quasiparticles in plaquette-nanowire hybrid system*, Sci. Rep. **9**, 12933 (2019), w której Autorzy wykazali możliwość delokalizacji MBS w heterostrukturach o mieszanej wymiarowości, takich jak jednowymiarowy łańcuch (nanodrut) stykający się z dwuwymiarową plakieta w pobliżu konwencjonalnego nadprzewodnika. Kiedy obie części układu, pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego i odpowiedniego przyłożonego napięcia, pozostawały w stanie nietrywialnego topologicznie nadprzewodnictwa, uzyskali wyjątkowo silną delokalizację MBS, w przeciwieństwie do przypadku układu z mieszanymi fazami trywialną i nietrywialną topologicznie.

Pozostałe publikacje zawierają także bardzo interesujące wyniki dla innych układów, w których kwazicząstki Majorany mogą powstawać i ulegać delokalizacji. Należy do nich nanodrut z oddziaływaniem Rashby naniesiony na podłoże nadprzewodzące. W takim nanodrucie pod wpływem dimeryzacji indukowane jest nadprzewodnictwo topologiczne i MBS – publikacja [1] Phys. Rev. B **101**, 085402 (2020). Kolejnym przykładem jest nadprzewodzący nanodrut Rashby, naniesiony na podłoże z porządkiem antyferromagnetycznym, którego bliskość prowadzi do pojawienia się MBS (bez zewnętrznego pola magnetycznego) – publikacja [2], Phys. Rev. B **103**, 125110 (2021). Innymi układami, w których spontanicznie pojawiają się kwazicząstki Majorany, mogą być nanołańcuchy magnetyczne, zbudowane z atomów wybranych metali przejściowych, naniesione na odpowiednie podłoża nadprzewodzące – publikacja [4] Phys. Rev. B. **101**, 205143 (2020). Wreszcie wykazano możliwość pojawienia się chiralnych modów MBS krążących wzdłuż krawędzi dwuwymiarowych nanopłatków (wysp) magnetycznych na powierzchni konwencjonalnego nadprzewodnika – publikacja [9] Phys. Rev. B **102**, 245405 (2020).

Rozdział 5 („*Final thoughts*”) dysertacji zawiera dwustronicowe podsumowanie i główne wnioski i tezy rozprawy. Doktorant słusznie stwierdza, że zbadane stany związane Majorany okazały się obiecujące do dalszych badań teoretycznych i eksperymentalnych nad technologiami kwantowych do obliczeń i zapisu informacji. Ogólnie kwazicząstki Majorany w wielu z rozważanych układów wykazały przydatną dla technologii kwantowych nielokalność, ponieważ mogą wnikać do przyłączonych struktur. Zjawisko to silnie zależy od wymiarowości układu, a także jego topologii.

Im niższy wymiar tym łatwiej manipulować MBS za pomocą zmian energii układu. Ponadto dzięki przemieszczaniu się MBS powstają prądy, których egzotyczne przewodnictwo można badać.

Bardzo wysoko oceniam metodologię podjętych badań, poziom merytoryczny, stylistyczny i językowy publikacji, które zawierają kompleksowe oraz czytelnie i barwnie zilustrowane opracowania szeregu interesujących wyników obliczeń analitycznych i numerycznych różnych wielkości dla złożonych układów nanoskopowych, dogłębnie przedyskutowanych także w konfrontacji z dostępnymi danymi eksperymentalnymi. Szerokie spektrum i różnorodność profesjonalnych badań, przeprowadzonych w ramach ocenianej dysertacji doktorskiej, pozwoliły uzyskać niezwykle wartościowe wyniki, istotnie poszerzające wiedzę o właściwościach i zachowaniu stanów związanych Majorany w rozmaitych nanostrukturach i możliwościach manipulacji nimi w celu zastosowań do obliczeń z użyciem przyszłych topologicznych komputerów kwantowych i zapisu informacji, odpornych na dekoherencję stanów kwantowych.

W całej rozprawie i publikacjach, opracowanych niezwykle starannie, znalazłam jedynie kilka błędów językowych, których trudno całkiem uniknąć, np. koniec zdania ze środka drugiego akapitu na str. 1: „Particle that would behave in such a way, later dubbed as *Majorana fermion*, would be self-conjugated – it would be its own particle”, powinien brzmieć „(...) its own antiparticle”; na str. 71: początek ostatniego zdania „Partial preparation numerical and analytical calculations, analysis and discussion of obtained results, (...)” powinien brzmieć „Partial preparation of numerical and analytical calculations, analysis and discussion of obtained results, (...)”.

Ostatni krótki Rozdział 6 („*List of publications and acknowledgement of funding*”) rozprawy zawiera imponujący wykaz wszystkich 12 oryginalnych publikacji mgr. inż. Aksela Kobiałki z listy JRC, w tym 9 pozycji z cyklu wchodzącego w skład recenzowanej rozprawy, oraz trzech grantów z Narodowego Centrum Nauki (NCN) w Krakowie, które Doktorant realizował, w tym dwóch OPUS, których kierownikiem był Promotor prof. Tadeusz Domański, oraz PRELUDIUM, którym sam kierował. Szkoda, że Doktorant nie zamieścił listy prezentacji konferencyjnych, która byłaby równie bogata, ponieważ wiele z nich obejrzałam osobiście, będąc pod wrażeniem ich wysokiego poziomu merytorycznego i graficznego. Nie pochwalił się także wyróżnieniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za artykuł popularnonaukowy „*Świat pelen Majoran*”, który wydany został w numerze Forum Akademickiego (2018). W dodatku ostatnio ukazała się w Phys. Rev. B. **103**, 235419 (2021) kolejna (13.) oryginalna publikacja, której jest współautorem. To wszystko świadczy o bardzo wysokiej aktywności naukowej Doktoranta.

Podsumowując, stwierdzam z głębokim przekonaniem, że recenzowana rozprawa doktorska pana mgr. inż. Aksela Kobiałki stanowi oryginalne rozwiązanie niezwykle aktualnego problemu naukowego w zakresie fizyki fazy skondensowanej, udokumentowane znakomitym cyklem 9 powiązanych tematycznie publikacji. W szczególności dysertacja wnosi istotny wkład w zrozumienie mechanizmów pojawiania się nadprzewodnictwa topologicznego i egzotycznych

stanów związanych Majorany oraz ich nielokalności w układach nanoskopowych. W mojej ocenie spełnia ona z naddatkiem wszystkie zarówno ilościowe jak i jakościowe ustawowe i zwyczajowe kryteria stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauk fizycznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie pana mgr. inż. Aksela Kobiałki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Dodatkowo, ze względu na opanowany przez Doktoranta zaawansowany warsztat badawczy, dzięki któremu umiejętnie przeprowadził dla wybranych modeli szereg złożonych obliczeń analitycznych i numerycznych, a także otrzymane bardzo wartościowe wyniki, osiągnięty wyjątkowo wysoki poziom merytoryczny cyklu publikacji wraz z przewodnikiem oraz bogaty dorobek naukowy proponuję wyróżnienie jego rozprawy doktorskiej.

