

dr hab. Wojciech Brzezicki
Zakład Kwantowej Teorii Wielu Ciał
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

Rozprawa doktorska pana magistra Kobiątki zatytułowana „Emergence and nonlocality of Majorana bound states in nanoscopic systems” dotyczy niezwykle obecnie modnego tematu stanów Majorany w układach nadprzewodzących, nanodrutach lub kropkach kwantowych.

Rozprawa składa się z czterech głównych rozdziałów, uwag końcowych oraz listy publikacji wraz z podziękowaniami do grantów. Rozdziały są podzielone na podsekcje i każdy kończy się osobną bibliografią, przy czym nie są one ujęte w spisie treści. Rozdziały to kolejno: wstęp zawierający tło historyczne badań stanów Majorany, ich możliwych zastosowań oraz realizacji, następnie ogólne wprowadzenie do cząstek Bogoliubova w nadprzewodniku, ich związek ze stanami Majorany oraz rola topologii w materii skondensowanej. Trzeci rozdział dotyczy głównie niezmienników topologicznych, stanów brzegowych oraz rozwiązania równań Bogoliubova-de Gennes’a opisujących nadprzewodnik. Wreszcie, ostatni z głównych rozdziałów zawiera dziewięć publikacji autora, stanowiących podstawę rozprawy. Publikacje te dzielą się na dwie grupy, pierwsza, zawierająca cztery artykuły, dotyczy pojawiania się stanów Majorany w różnych układach jednowymiarowych i kropkach kwantowych. Druga grupa dotyczy problemu możliwej delokalizacji stanów Majorana do podukładu będącego w fazie topologicznie trywialnej, który to podukład jest połączony z resztą układu, który jest w fazie topologicznie nietrywialnej.

Rozdział pierwszy zaczyna się od wprowadzenia historycznego do hipotetycznych cząstek i stanów Majorany. Jest ono sprawnie napisane, zawiera istotne referencje oraz najważniejsze informacje. Podrozdział ten kończy się wypisaniem dwóch równoważnych hamiltonianów opisujących jednowymiarowy nadprzewodnik typu p w języku fermionów Diraca i Majorany. Do pełnego obrazu zabrakło mi tu tylko tego samego hamiltonianu zapisanego jako model Isinga w polu poprzecznym, który można znaleźć w pracy Kitaeva i Laumanna z roku 2009. Nie jest to jednak istotna wada.

W kolejnym podrozdziale, dotyczącym zastosowań jest ewidentna literówka z czasem dekoherencji „ 10^{10} s”, błąd stylistyczny „matrices describing matrices” oraz w przypisie 5, na samym końcu, macierz U_B działa na skalar Ψ , co nie może być poprawne. W dalszej części, pod Rys. 1.3, zdania zaczynające się od „This concludes ...” do końca akapitu są zbyt szczegółowe i niezrozumiałe na tym etapie rozprawy. W ostatnim akapicie sformułowanie „corresponding ground states are locally indistinguishable” jest niejasne. Niemniej podrozdział na temat zastosowań jest interesujący i dobrze motywuje zainteresowanie stanami Majorany.

Trzeci podrozdział dotyczy realizacji doświadczalnej tych stanów w układach nadprzewodzących. Zawiera on sporo wyników z prac doświadczalnych, które dowodzą, że można obserwować oznaki

spektralne istnienia stanów brzegowych w zerze energii w układach nadprzewodzących. Jest on nieźle napisany, jednak zawiera nieco literówek i niezręcznych lub niejasnych sformułowań. Np. poniżej równania 1.6 jest zdanie „Points $p=0$ and $p=p_F$... simplify the above condition”, które brzmi dziwnie bo warunek 1.6 już jest prosty. Z kolei zdanie „high spin-orbit coupling is an inherent property of semiconductors” nie wydaje się prawdziwe ze względu na krzem. Nie jest też jasne co znaczy „peak of a single quantum of conductance”, tym bardziej, że dalej jest zdanie mówiące o pikie o intensywności 5% kwantu przewodnictwa. Z kolei zdanie na końcu strony 13 „This shows ...” jest zawile i niejasne i powinno być „in a topologically nontrivial region”. Dalej, w podpisie Rys 1.8 jest „Comparison between of the...”, oraz poniżej „subsequent measurements can be expressed as a Chern number”, co nie ma sensu. W kolejnym akapicie brakuje też „Fig. 1.8” przy przywoływaniu paneli (a-e). W akapicie zaczynającym się od „Lastly, ...” dość zaskakująco autor używa zaimka „they” choć wszystko wcześniej było pisane bezosobowo, poza tym zdania opisujące przygotowanie nandrutów na powierzchni próbki, od „Inserting an STM tip” do „at the designated place” są trudne do zrozumienia. Dalej, sformułowanie „spin-orbit coupling in this system was in the form of spin spiral” jest niepoprawne, zdania na stronie 17 nad Rys. 1.9 są niepotrzebnie zawile i mają prostą myśl. Z kolei w opisie Rys. 1.9 mamy „one can an alike distribution” oraz „On the zero energy”.

W ostatnim podrozdziale rozdziału pierwszego autor opisuje motywację dla swoich badań teoretycznych stanów Majorany w odniesieniu do wcześniejszych rozważań oraz kończy akapitem opisującym zawartość kolejnych rozdziałów. Motywacja jest rzeczywiście przekonująca jednak jest też trochę błędów redakcyjnych. Mamy więc „transmon gates”, które nie są nigdzie omawiane, więc na tym etapie nie wiemy czym są. Dale mamy skrót MQP, który nie jest nigdzie zdefiniowany. Wreszcie jest długie zdanie zaczynające się od „MBSs behaviour ...”, które jest trudne do zrozumienia. Na sam koniec mamy dwa zdania o bardzo górnolotnym brzmieniu. Niezależnie od tego czy tu pasują, pierwsze jest gramatycznie niepoprawne bo początek „As an aspiring physicist ...” nie ma logicznej kontynuacji na końcu, gdzie mamy „...seems like a dream come true”.

Podsumowując, rozdział pierwszy jest merytorycznie udany i nieźle się czyta, natomiast nie ustrzegł się niewielkich błędów redakcyjnych. Przydałaby się także lista skrótów na samym początku.

Rozdział drugi zaczyna się od podkreślenia związku między kwazicząstkami Bogoliubova i stanami Majorany. Po jego przeczytaniu można być przekonany, że taki związek jest, natomiast są problemy jeśli chodzi o szczegóły, ze względu na sporą ilość błędów, także rzeczowych. Mamy więc na początku odsyłacz do transformacji Bogoliubova-Valatina, która dopiero w kolejnym rozdziale, kilka stron do przodu – nie jest to zręczne. Dalej, w równaniach (2.1 - 2.2) współczynniki u i v występują bez indeksu i , a dalej już z tym indeksem. Później znów jest odsyłacz do hamiltonianu (3.1), który jest niepraktycznie daleko. Następnie mamy zdanie „The only caveat is that in a different basis, the form of charge conjugation operator ...”, które jest niejasne i wydaje się niegramatyczne. Dalej, równanie (2.4) nie wydaje się wynikać w oczywisty sposób z tego, co jest napisane wcześniej, chociaż napisano „straightforward contemplation”. Później mamy zdanie „... for this superconducting gap should close and reopen”, które jest ogólnie nieprawdziwe bo topologii nie da się sprowadzić jedynie do zachowania przerwy. Znów pojawia się niezdefiniowany skrót ABS. Niestety mamy w tym podrozdziale także błąd

rzeczowy: równanie (2.5) jest zapewne niepoprawne, ponieważ otrzymany z niego operator nie jest hermitowski, jak napisano pod nim.

Drugi podrozdział zawiera opis w własności fermionów Majorany w porównaniu z fermionami Diraca. Nie zawiera on większych błędów, jedynie literówkę „forgo” oraz niezręczne sformułowanie „following section”, bo nie wiadomo, która to będzie sekcja, jeśli to nie jest najbliższa. Na koniec zamiast kolejnego podrozdziału mamy mniejsze jednostki:

---(2.2.1) zaczyna się od dziwnej deklaracji, że model Kitaeva nie będzie omawiany. Nie wiadomo czemu ma służyć taka deklaracja. Celem podrozdziału ewidentnie jest opisanie modelu nanodrutu Rashby, według przepisu Orega-Lutchyna. Niestety są tutaj poważne błędy rzeczowe, które znacząco obniżają jakość tekstu. Zaczynając od drobniejszych spraw, w hamiltonianie (2.10) brak oznaczenia, że suma jest po najbliższych sąsiadach. Dalej, akapit zaczynający się od „In the 2D case” powoduje zamieszanie, bo skąd nagle dwa wymiary, z kolei powiązanie oddziaływania Rashby z krzywizną Berry’ego i efektem spinowym Halla jest po prostu błędne. Następnie znów pojawia się „following section” i nieco dziwne sformułowanie „In 1D of a nanowire system”. Bardziej problematyczne jest natomiast to, że hamiltonian (2.14) jest niepoprawny. Sformułowany z czysto urojonymi $L(k)$ jest niehermitowski z kolei jeśli przyjąć, że $L(k) = 2\lambda \sin(k)$, to nie posiada symetrii cząstka dziura ani nie ma takiego spektrum jak w równaniu (2.15). Z kolei symetria odwrócenia czasu, taka jak zdefiniowana na dole strony 40 daje oczywiście $T^2 = -1$, a nie $T^2 = 1$ jak napisano. To sprawia, że dyskusja klas Altlanda-Zirnbauera, która następuje później, nie ma sensu. Rysunek 2.3 jest oczywiście poprawny, ale powinno być zaznaczone, że dotyczy dowolnego punktu wysokiej symetrii, nie tylko $k = 0$.

---(2.2.2) ma na celu omówienie problemu nielokalności fermionów Majorany, jednak jest to zrobione jedynie na poziomie żargonu. Mamy na przykład sformułowania takie jak: „... can be imagined as the entanglement of those electron parts” oraz „... MBS have only half of the regular electron’s fermionic degree of freedom. This allows for nontrivial phenomena like teleportation”, które w istocie niczego nie wyjaśniają. Następnie mamy zdanie „... Kitaev model with an additional ϵ_m term, representing the energy equivalent of MBS wave function overlap ...”, które jest kompletnie niejasne. Na koniec raz jeszcze przywołana jest idea „wyciekania” fermionów Majorany i ta część jest zrozumiała i sensowna.

Trzeci podrozdział mówi nieco o roli topologii w teorii materii skondensowanej, wprowadza koneksję i krzywiznę Berry’ego oraz zawiera podsekcję na temat zaplatania fermionów Majorany. Część ogólna nie jest niestety zbyt dobrze napisana, ma trochę stwierdzeń wprowadzających w błąd i jawnie nieprawdziwych. Zdanie otwierające „Usually, in order to show that something possesses some properties, we need an indicator of it” należy do kategorii zawsze prawdziwych, ale niewiele z niego wynika. Dalej mamy dość niefortunne zdanie: „Such topological invariants would take various forms due to the symmetries obeyed by the system and its symmetries” z kolei „This closing is usually an effect of an unnatural alliance between Zeeman energy and superconducting gap” wprowadza w błąd bo nazwa podrozdziału sugeruje ogólne rozważania, a zdanie jest prawdziwe tylko dla jednego modelu. Następnie mamy stwierdzenie „This relates to an odd number of time reversal invariant momenta (TRIM) in the Brillouin zone”, które jest bez sensu, bo liczba TRIMów jest zawsze parzysta i wynosi 2^D w D wymiarach. Na koniec akapitu, zdanie „In the 2D case, ...” jest niejasne i odwołuje się do pracy, która nie była omawiana wcześniej. Na Rys. 2.4 pojawia się dziwna dla mnie koncepcja „edge states for topologically nontrivial superconductor” – nie wiadomo skąd te stany w fazie trywialnej. Pod rysunkiem 2.4 zdanie „This class has a Z2 topological invariant” jest błędne, bo w klasie D, jak każdej innej, typ niezmiennika

zależy od wymiaru układu. Zaraz po tym zdaniu mamy kompletnie niejasną konstrukcję „States of opposite energy paired ...”, która wprowadza w błąd sugerując, że faza Berry’ego potrzebuje do zdefiniowania stanów o przeciwnej energii, cokolwiek to oznacza. Następnie mamy już gruby błąd, zdanie pod równaniem (2.18) twierdzące, że faza Berry’ego jest zawsze skwantowana. Jest to nieprawda, do tego potrzebne są dodatkowe symetrie jak np. inwersja przestrzenna lub czysto rzeczywisty hamiltonian. Wzór (2.19) wiążący A koneksję Berry’ego z krzywizną Berry’ego Ω oczywiście nie ma sensu w jednym wymiarze, wymagałby zdefiniowania A jako wektora. Nie napisano też w jaki sposób z Ω otrzymać liczbę Cherna, choć to tylko jeden krok. Zdanie „In the case of defects, a nontrivial winding of the bulk topological parameters around the defect gives us information about the phase of the system” jest kompletnie bez sensu.

---(2.3.1) ma na celu omówienie nieabelowych anionów, co sprowadza się do rozważania operatora zamiany dwóch fermionów Majorany. Równania w tej części są poprawne niemniej trudno jest podążać za wywodem ponieważ powiązania logiczne między tekstem a równaniami są dziwne. Niemniej, ostatecznie można zrozumieć o co chodzi. Jest też kilka dziwnych lub nieprawdziwych sformułowań, takich jak: „the order of this exchange does affect the outcome in any way” (nie wiadomo co to znaczy), „non-Abelian behaviour of the degenerate many-body ground state” (przecież zawsze są rozważane funkcje falowe jednocząstkowe, nigdy wielociałowe bo nie ma oddziaływań), „highly nonlocalized entanglement” (nie wiadomo co to znaczy), „we exchange both Majoranas – not with respect to each other, but rather with respect to some point in space” (a co za różnica?), „opposite values of 1” (wartość jedynki to zawsze 1), „Concluding, if one imagines a system where $2N$ MBS exists ...” (zdanie jest poprawne, ale to nijak nie konkluduje tego co było napisane wcześniej), „which reminds one that all Majorana operators anticommute with each other” (co przypomina i na jakiej zasadzie?), „However, if two pairs share one of the Majorana operators, they cease to anticommute” (kompletnie niejasne), „reduces ground state degeneracy by factor of 2” (to że jest dodatkowa dobra liczba kwantowa nie znaczy, że degeneracja jest niższa).

Podsumowując, rozdział drugi wprawdzie wprowadza istotne pojęcia, jak stan Majorany, model Rashby i stanach topologicznych w tym modelu, ale zawiera mnóstwo błędów.

Rozdział trzeci zaczyna się od omówienia równań Bogoliubova - de Gennes’a. Efektywnie sprowadza się to do wyprowadzenia macierzowej postaci hamiltonianu nadprzewodzącego oraz wyrażenia lokalnej gęstości stanów poprzez współczynniki transformacji Bogoliubova. Ta część jest poprawna, uwagi można mieć jedynie do stwierdzeń takich jak: „Stemming from that below” (nie wiadomo co z czego ma wynikać), „making up this thesis” (zbyt nieformalne jak na rozprawę), „order parameter with is pairing potential $U < 0$ ” (nie wiadomo o co chodzi).

Drugi podrozdział traktuje o niezmiennikach topologicznych, jakie były używane przez autora w studiach nad stanami Majorany. Ta część pracy jest napisana wyjątkowo źle – większość wzorów na niezmienniki jest niepoprawna lub wymaga doprecyzowania, a wiele zdań jest niejasnych lub niepoprawnych. Mamy zatem: „charge of topological invariants” (nie ma czegoś takiego, są tylko niezmienniki), „D class of topological systems, in which Rashba nanowire setup resides” (wcześniej autor się upierał przy klasie BDI), „Pf(H) allows one to obtain a precise sign of the determinant’s square root” (znak pierwiastka liczby rzeczywistej dodatniej jest z definicji pierwiastka zawsze dodatni, pfaffian nie ma

WB

nic do rzeczy), „Such a matrix can be obtained from any Bogoliubov–de Gennes type Hamiltonian H_{BdG} after rotating it” (to jest nieprawda, tylko w punkcie wysokiej symetrii i tylko jeśli symetria cząstka dziura ma określoną postać), „Hamiltonian at TRIM can be represented in a skew symmetric form” (to jest też nieprawda, taka postać istnieje tylko jeśli mamy chiralność), równania (3.11) (nie widać żeby H było antysymetryczne), równanie (3.12) (kompletnie nieprawdziwe, nie wiadomo czemu $H \cdot \tau_x$ ma być antysymetryczne), równanie (3.13, 3.14) (ten sam problem co z 3.12), „where w is the winding number for given topological phase” (klasa D nie ma liczby nawinięć), „As a result, instead of simply signifying the parity of winding with Pfaffian, we obtain the correct information about the topological state of the system” (nie wiadomo co to zdanie ma oznaczać), równanie (3.15) (to nie jest prawidłowy wzór ogólny na liczbę nawinięć, nie wiadomo czemu całka nie jest po całej strefie Brillouina, tego nie ma w [27]), „Rotating S with U makes it essentially ...” (nie wiadomo o co chodzi w tym zdaniu), równanie (3.16) (na pewno złe bo tylko pół wyrażenia jest pod śladem, $\mathcal{A}$ pisane czcionką kaligraficzną oznacza koneksję Berry’ego), równanie (3.15) (podobny problem z $\mathcal{A}$), równanie (3.18) (całka powinna być od $-\pi$ do π), „Parity operator $\mathcal{P}$ is defined as anticommuting” ($\mathcal{P}$ było do tej pory symetrią cząstka dziura, nie wiadomo o jaką parzystość chodzi), równanie (3.19) (wzór bez sensu, nie wiadomo po czym iloczyn i o co chodzi, nie ma tego w [27]), „if Majorana quasiparticles would be present in the system” (ale to dotyczy tylko układu z brzegiem), „the composite methods” (skąd „the” jeśli ten termin nigdzie nie był zdefiniowany?), „do not necessarily possess the same gap size. This might lead to ambiguity” (co ma wielkość przerwy do niezmiennika? Niezmiennik wynika z wektorów a nie wartości własnych), „belong to which topological phase due to the high contrast between distinct parts” (ta sama uwaga co wcześniej), „chemical potential measured from bottom of band for the homogeneous system, varying from site to site” (nie wiadomo o co chodzi, więc równanie 3.20 jest niejasne), „However, as the studied system is under a constant magnetic field, it can be subtracted to show the possible topological state of the system” (nie wiadomo o co chodzi). Poza tym, nigdzie nie omówiono podejścia „scattering matrix” pokazanego na rysunku 3.2(a).

Podsumowując, rozdział trzeci pokazuje wprawdzie praktyczne podejście do stanów topologicznych w modelu Rashby, polegające na liczeniu niezmienników oraz szukaniu stanów brzegowych, ale opis niezmienników roi się od poważnych błędów.

Rozdział czwarty ma na celu omówienie dziewięciu prac autora będących podstawą rozprawy. Zaczyna się od krótkiej zapowiedzi poszczególnych artykułów i opisu tego, jakie problemy fizyczne są w nich adresowane. Wprowadzony jest podział publikacji na te dotyczące pojawiania się stanów Majorany oraz te dotyczące ich nielokalności, przeciekania do obszarów trywialnych. Jest to sensowny podział.

Pierwszy z pięciu artykułów dotyczących pojawiania się stanów Majorany został opublikowany w czasopiśmie recenzowanym dobrej klasy (Journal of Physics: Condensed Matter). Studiowanym układem jest nanopierścień w którym przy pomocy pola elektrycznego generowany jest defekt, na którym mogą lokalizować się stany Majorany. Artykuł jest interesujący i stanowi wartościowy wkład do dziedziny. Został on napisany z współautorem, ale wkład pana Kobiałki był istotny (pierwszy autor). Podobnie jak każdy kolejny artykuł z listy jest on poprzedzony zwięzłym omówieniem wyników. Tutaj można mieć następujące uwagi: „However, here, we instead propose a ring made of Rashba nanowires, that connect both edges which (under proper conditions) would be occupied by MBS” (zdanie niejasne), „Building on

that, periodic boundary conditions for such supercell can be acquired, which allows momentum space perspective investigation" (zdanie niejasne), „analysis and discussion" (literówka).

Drugi artykuł dotyczy modelu nanodrutu Rashby, w którym pojawia się dodatkowo dimeryzacja. W ten sposób mamy interpolację między standardowym modelem nanodrutu a modelem SSH. Artykuł opublikowany jest w czasopiśmie recenzowanym bardzo dobrej klasy (Physical Review B) wraz z trzema współautorami, przy czym wkład pana Kobiółki był istotny (pierwszy autor). Artykuł jest interesujący i stanowi wartościowy wkład do dziedziny. Patrząc na taki model nasuwa się pytanie, czy może on mieć więcej niż jedną fazę topologiczną, wynikającą z niezerowej liczby nawinięć.

Trzeci artykuł został napisany wspólnie z grupą zajmującą się układami skorelowanymi. Przedmiotem badań jest łańcuch atomów metalu przejściowego o konfiguracji 3d. Badany jest między innymi wpływ podłoża na fazę topologiczną, przy czym parametry modelu ciasnego wiązania są otrzymane z obliczeń typu DFT wykonanych przez jednego z współautorów. Jest więc to praca będąca nieco bliżej prawdziwych układów. Artykuł opublikowany jest w czasopiśmie recenzowanym bardzo dobrej klasy (Physical Review B) wraz z trzema współautorami, przy czym wkład pana Kobiółki był istotny (pierwszy autor). Artykuł jest interesujący i stanowi wartościowy wkład do dziedziny. Ze względu na znaną rolę korelacji w układach tlenków metali przejściowych nasuwa się tu pytanie o rolę korelacji w takim niskowymiarowym układzie i ich wpływie na stany Majorany.

Czwarty artykuł także został opublikowany jest w czasopiśmie recenzowanym bardzo dobrej klasy (Physical Review B) wraz z dwoma współautorami, przy czym wkład pana Kobiółki był istotny (pierwszy autor). Praca dotyczy modelu nanodrutu Rashby z porządkiem antyferromagnetycznym. Porządek ten może modyfikować topologiczny diagram fazowy. Artykuł jest interesujący i stanowi wartościowy wkład do dziedziny. Pytanie jakie się nasuwa przy okazji czytania tej pracy to w jaki sposób liczyć niezmiennik Z_2 w przypadku kiedy hamiltonianu nie da się sprowadzić do postaci blokowo-antydiagonalnej i problemu nie da się sprowadzić do wyznacznika.

Piąty artykuł stanowi początek serii dotyczącej efektu wyciekania stanów Majorany poza obszar topologiczny układu. Praca ta została opublikowana w czasopiśmie recenzowanym bardzo dobrej klasy (Physical Review B) wraz z dwoma współautorami. Pan Kobiółka jest tutaj drugim autorem. Artykuł dotyczy nanodrutu z kropką kwantową na jednym końcu i jest zainspirowana pracą doświadczalną. Artykuł jest interesujący i stanowi wartościowy wkład do dziedziny.

Szósty artykuł to praca konferencyjna opublikowana w Acta Physica Polonica A. Pan Kobiółka jest to pierwszym z dwóch autorów. Praca dotyczy wyciekania stanów Majorany w nanodrucie; którego tylko część jest w fazie nadprzewodzącej nietrywialnej.

Siódmy artykuł to praca opublikowana w czasopiśmie recenzowanym bardzo dobrej klasy (Scientific Reports) wraz z dwoma współautorami, przy czym wkład pana Kobiółki był istotny (pierwszy autor). Przedmiotem badań jest niezwykle ciekawy układ składający się z plakiety dwuwymiarowej z podłączonym nanodrutem. Praca bada delokalizację stanu Majorany w sytuacji kiedy plakieta albo ma albo nie ma metalicznego stanu brzegowego. Jest to ciekawa praca stanowiąca wartościowy wkład do dziedziny. Można tutaj mieć drobne uwagi co do wprowadzenia: „MZM” (skrót nigdzie niezdefiniowany), SESAR (skrót niezdefiniowany do tego miejsca w tekście).

Ósmy artykuł to praca konferencyjna opublikowana w Acta Physica Polonica A. Pan Kobiółka jest to pierwszym z dwóch autorów. Praca dotyczy wyciekania stanów Majorany w nanodrucie z dimeryzacją. W układzie znajduje się trywialna domieszka na jednym z końców.

WB

Dziewiąty i ostatni artykuł to praca opublikowana w czasopiśmie recenzowanym bardzo dobrej klasy (Physical Review B) wraz z sześcioma współautorami. Wkład pana Kobiałki polegał tu na analizie wyników i dyskusji i jest on czwartym autorem. Praca nieco różni się od pozostałych ponieważ dotyczy stanów brzegowych nadprzewodnika dwuwymiarowego, czy tzn. chiralnych pasm Majorany.

Rozdział piąty to zakończenie pracy będące podsumowaniem wyników opisanych w rozdziale czwartym. Jest ono sprawnie napisane i nie zawiera błędów ani nieścisłości.

Podsumowując, pan Kobiałka w czasie swoich studiów doktorskich opublikował dziewięć artykułów z których większość jest w bardzo dobrych czasopismach. W zdecydowanej większości z nich jest on pierwszym autorem i Jego wkład w powstanie artykułu jest bardzo istotny. Każdy z tych artykułów jest oryginalny i stanowi wartościowy wkład do dziedziny. Dorobek naukowy pana Kobiałki jest więc wystarczający i spełnia z nadmiarem przyjęte zwyczajowo wymagania dla kandydatów do stopnia doktora nauk fizycznych. Z tego względu, pomimo potknięć w rozdziałach drugim i trzecim rozprawy wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie pana magistra Aksela Kobiałki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków 16.09.2021

Wojciech Przeździecki

WB