

Hipoteza naukowa oraz cel badań

W ostatnich latach prowadzone są intensywne badania unikalnych właściwości nowych materiałów oraz nanostruktur z zaindukowanym nadprzewodnictwem, którego topologiczne i kwantowe cechy nie mają analogii w znanych materiałach litych. Współczesna technologia umożliwia uzyskiwanie takiej egzotycznej wersji nadprzewodnictwa w atomach, molekułach, nanorurkach węglowych i wielu innych ultra-małych obiektach, których rozmiary są mniejsze od średniej drogi swobodnej elektronu. W pewnych szczególnych warunkach można nawet wygenerować topologicznie nietrywialną fazę nadprzewodzącą, której niskoenergetyczne widmo wzbudzeń wykazuje obecność kwazicząstek typu Majorany. Na przestrzeni ostatnich kilku lat udało się je doświadczalnie zaobserwować w nanodrutach półprzewodnikowych, nanołańcuchach magnetycznych atomów oraz litograficznie wytwarzanych strukturach, indukując nadprzewodnictwo poprzez efekt bliskości (czyli sprzęgając z litym rezerwuarem nadprzewodzącym). Kwazicząstki Majorany (obiekty równoważne swoim antycząstkom) charakteryzują się zerową energią, ładunkową neutralnością oraz są „topologicznie chronione”, tzn. lokalne zaburzenia nie mogą ich zniszczyć. Jako stany odporne na dekoherencję podlegają też nieabelowej statystyce, co czyni je idealnymi kandydatami do realizacji bitów kwantowych z perspektywą obliczeń kwantowych bez ryzyka omyłek. Od strony formalnej kwazicząstki Majorany są szczególną wersją („mutacją”) stanów Andreeva/Shiby, które są przedmiotem badań proponowanych w niniejszym wniosku o grant.

W szczególności proponujemy zbadać następujące aspekty fizyczne:

- (i) rolę wewnątrz-przerwowych stanów związanych (nazywanych kwazicząstkami Andreeva lub Shiby) w strukturach wieloelektrodowych, umożliwiających nielokalny transport ładunku, spinu i energii,
- (ii) efekty dynamiczne dla stanów Andreeva/Shiby (czyli np. określenie czasu powstawania/destrukcji tych stanów oraz analizę kwantowych oscylacji, funkcji korelacyjnej typu prąd-prąd, czasu oczekiwania),
- (iii) kwantowe przejścia fazowe zaindukowane subtelną współzależnością parowania elektronowego i korelacji wraz z analizą realizowalnej obserwowalności metodami elektrostycznymi/magnetycznymi,
- (iv) zbadanie spinowo-spolaryzowanych kwazicząstek Majorany w nadprzewodnikach topologicznych,
- (v) teleportację ładunku/spinu zaindukowaną krzyżowymi odbiciami Andreeva przez stany Majorany,
- (v) rolę oddziaływań spinowo-orbitalnych w nadprzewodnikach nanoskopowych.

Metodologia projektu badawczego

Do analizy parowania i zjawisk korelacyjnych będziemy stosować takie metody, jak: a) samouzgodyiony formalizm rachunku zaburzeniowego względem potencjału Coulomba, b) ścisłe rozwiązanie w granicy dużej przerwy nadprzewodnika i jego uogólnienia na warunki realistyczne, c) zaburzeniowe traktowanie sprzężenia do zewnętrznych rezerwuarów, d) symulacje przy pomocy kwantowej metody Monte Carlo, f) obliczenia techniką numerycznej grupy renormalizacyjnej itp. Do badania kwazicząstek Majorany w drutach kwantowych o skończonej długości (~200 nm) zastosujemy podejście Bogoliubova de Gennes'a, które daje wgląd do przestrzennej oraz spinowej zależności widma energetycznego i badania efektów indukowanych przez wewnętrzne defekty kwantowe, interfejsy czy niejednorodność. Zjawiska dynamiczne dla stanów Andreeva/Shiby będą również badane wieloma technikami, np. a) rozwiązując równanie Heisenberga dla operatorów drugiej kwantyzacji, b) wyznaczając czasową zależność operatora ewolucji, c) obliczając nierównowagowe funkcje Greena wzdłuż konturu Kiełdysza d) przy pomocy tzw. „full-counting-statistics”, podejścia czasu oczekiwania oraz innych metod.

Oczekiwany wpływ projektu na rozwój nauki i społeczeństwa

Badanie nielokalnego transportu, nierównowagowych stanów Andreeva/Shiby, kwantowych przejść fazowych, kwazicząstek Majorany, spinowo-spolaryzowanych krzyżowych odbić Andreeva, elektronowej teleportacji mogą być obecnie weryfikowane przy pomocy spektroskopii z rozdzielczością przestrzenną, spinową i czasową. Analiza tych zjawisk jest cenna dla badań podstawowych jak też można oczekiwać przełożenia na praktyczne zastosowania w informatyce kwantowej (do konstrukcji qubitów i obliczeń kwantowych), nowych urządzeń elektronicznych/spintronicznych, czułych detektorów pól magnetycznych (np. istotnych dla medycyny) oraz innych zastosowań w nanotechnologii. Większość badań proponowanych w granicy będzie realizowana we współpracy z uznanymi naukowcami z Polski i zagranicy. Taka inicjatywa może przynieść wymierne korzyści dla młodszych uczestników grantu (doktorantów) oraz umożliwi powiązanie Uniwersytetu M. Curie-Skłodowskiej z renomowanymi ośrodkami badawczymi w Europie.