

Projekt dotyczy teoretycznego opisu własności nanostruktur hybrydowych—urządzeń, o wymiarach rzędu dziesiątek bądź setek nanometrów, które są konstruowane przez połączenie materiałów półprzewodnikowych i nadprzewodzących. Struktury te można wykorzystać do konstruowania nowatorskich topologicznych faz materii (odkrycie topologicznych faz materii zostało nagrodzone Nagrodą Nobla w 2016 roku). W szczególności mogą być one używane do realizacji fazy topologicznego nadprzewodnictwa, w której występują egzotyczne kwazicząstki, które są swoimi własnymi antycząstkami, a które były od dawna poszukiwane wśród cząstek elementarnych—fermiony Majorany. W ostatnim dziesięcioleciu struktury hybrydowe wzbudziły wyjątkowe zainteresowanie, które motywowane z jednej strony jest dążeniem do realizacji chronionych topologicznie obliczeń kwantowych (stany Majorany można wykorzystać do przechowywania informacji kwantowej odpornej na wpływ otoczenia), ale także fundamentalną atrakcyjnością samych struktur—nietrywialne fazy materii oraz wynikające z nich unikalne stany kwazicząstkowe, które możliwe są do zrealizowania w tych układach, bardzo często są niemożliwe do osiągnięcia w materiałach litych.

W ramach prac badawczych przebadamy topologiczne nadprzewodnictwo w układach, które stały się dostępne jedynie w ostatnich latach—planarnych złączach Josephsona—płatkach materiału półprzewodnikowego zawierającego dwuwymiarowy gaz elektronowy połączony z kontaktami nadprzewodzącymi. Wyjaśnimy, w jaki sposób stany topologiczne na krawędziach układu oddziałują z trywialnymi stanami brzegowymi, które mogą powstać ze względu na rozkład potencjału elektrostatycznego lub tymi indukowanymi przez pole magnetyczne. Struktury tego typu będą budowane i badane eksperymentalnie w grupie naszego zagranicznego partnera. Nasze modelowanie będzie poprzedzać prace eksperymentalne eksplorując zjawiska fizyczne możliwe do zademonstrowania w eksperymencie. W szczególności przeanalizujemy bezprecedensową możliwość wizualizacji ścieżek, po których przepływają nośniki ładunku przenoszące prąd nadprzewodzący (prąd, który płynie, gdy materiał nie ma oporu) w strukturze hybrydowej. W ramach projektu odniesiemy się również do niedawnych i jak dotąd pozostających bez wyjaśnienia pomiarów prądu w nanodrutach połączonych z kontaktami nadprzewodzącymi, gdzie wielokrotna konwersja kwazicząstek do par Coopera określa przewodność układu. Analiza ta zostanie wykorzystana do ustalenia właściwości złącza półprzewodnik-nadprzewodnik.

W małych wyspach półprzewodnikowych odpychanie elektronów determinuje strukturę elektronową w podobny sposób jak w naturalnych atomach. Sytuacja staje się bardziej złożona, gdy taka wyspa jest połączona z nadprzewodnikiem, który w naturalny sposób może połączyć dwa elektrony w parę Coopera. W ramach naszego projektu opiszemy to zjawisko i wyjaśnimy wpływ oddziaływań elektron-elektron na możliwość tworzenia w strukturze zlokalizowanych na brzegach stanów Majorany. Ponadto, przedstawimy realistyczny opis nadprzewodzących kwantowych nośników informacji—kubitów —realizowanych na nanostrukturach hybrydowych. Nadprzewodzące obwody kubitowe pozwoliły w ostatnich latach na konstrukcję działających procesorów kwantowych. Niemniej jednak zapotrzebowanie na skalowanie liczby bramek kwantowych skutkuje dążeniem do tworzenia lepiej kontrolowanych i lepiej chronionych kubitów. Nasze badania zaowocują ustaleniem właściwości takich struktur wykonanych z hybryd nadprzewodzących, w których informacja kwantowa zapisana jest na wzbudzeniach oscylatora kwantowego zbudowanego w oparciu o złącze nadprzewodnik-półprzewodnik-nadprzewodnik.

Pomyślna realizacja projektu zapewniona będzie przez powołanie nowego zespołu badawczego oraz zastosowanie najnowocześniejszych metod obliczeniowych do transportu kwantowego. Teoretyczny opis nadprzewodzących urządzeń hybrydowych, który powstanie w ramach projektu, nie tylko dostarczy prognoz, które pozwolą pokierować nadchodzącymi eksperymentami ale także wyjaśni bieżące pomiary i stworzy podstawy teoretyczne do zrozumienia złożonej zależności między efektami występującymi w półprzewodnikach i nadprzewodnikach w skali nano.