

Wiele właściwości niskoenergetycznych układów materii skondensowanej można zrozumieć za pomocą niezmienników topologicznych. Są to liczby całkowite związane z pewnymi abstrakcyjnymi cechami stanów kwantowych, które przesuwane równolegle wzdłuż zamkniętej krzywej w przestrzeni parametrów (pędu, położenia lub innych) mogą nabierać niezerowej fazy, zwanej fazą Berry'ego. Wyjaśniają one dokładność kwantyzacji niektórych wielkości fizycznych, takich jak związek między częstotliwością a napięciem w efekcie Josephsona prądu zmiennego, kwantyzacja strumienia pola magnetycznego w nadprzewodnikach i kwantyzacja przewodności w kwantowym efekcie Halla. Najważniejszą własnością stanów topologicznych jest zamykanie się przerwy energetycznej na granicy faz o różnych wartościach niezmiennika topologicznego oraz tzw. korespondencja brzegu z objętością mówiąca, że na powierzchni izolatora o zadanym niezmienniku topologicznym zawsze pojawiają się stany metaliczne, czyli o zerowej przerwie, których liczba odpowiada temu niezmiennikowi. Topologiczne stany brzegowe są szczególnie interesujące ze względu na możliwe zastosowania, między innymi w informatyce kwantowej, spintronice oraz metrologii. Stanami brzegowymi są na przykład stany Majorany, które cechują się egzotyczną statystyką kwantową, inną niż fermiony i bozony, dającą nadzieje na topologicznie chronione kubity. Najnowsze badania nad materiałami topologicznymi koncentrowały się na niezmiennikach topologicznych chronionych symetrią, które powstają w wyniku defektów topologicznych w przestrzeni pędu i opisują istnienie chronionych stanów powierzchniowych. Główną zaletą rozważań topologicznych jest to, że niezmienniki topologiczne przyjmują wartości dyskretne, a zatem nie mogą być modyfikowane przez słabe zaburzenia. Ochrona ta jest gwarantowana, dopóki nie są złamane symetrie układu, które pozwalają na zdefiniowanie różnych niezmienników.

Badania doświadczalne doprowadziły jednakże do istotnych rozbieżności względem prostych modeli teoretycznych, kwestionując całą topologiczną naturę tych układów. W szczególności nadal nie ma zgody co do interpretacji obserwowanego eksperymentalnie braku ochrony topologicznej transportu przez stany brzegowe w modelowym izolatorze topologicznym, studni kwantowej HgTe/CdTe, tzn. niedokładności kwantyzacji przewodnictwa przy braku zewnętrznego pola magnetycznego. Zrywając z popularnym trendem koncentrującym się na wyidealizowanych prostych modelach izolatorów topologicznych, opracujemy teorię rzeczywistych *półprzewodników topologicznych*, biorąc pod uwagę prawdziwe sieci krystaliczne i ścisłe oraz przybliżone symetrie tych materiałów.

Jednym z istotniejszych zagadnień badanych w ramach tego projektu będzie wyjaśnienie problemu kwantyzacji przewodnictwa w studiach kwantowych w oparciu o wstępne wyniki, które wskazują na obecność dodatkowych, niespodziewanych stanów brzegowych w przerwie energetycznej. Ich ilość jest proporcjonalna do ilości warstw HgTe/CdTe w układzie i nie wynikają one ze standardowego, uproszczonego modelu tych studni. Hipoteza robocza jest taka, że elektrony w tych dodatkowych stanach mogą ulegać lokalizacji ze względu na nieporządek i być źródłem dekoherencji i defazowania dla stanów helikalnych, jakie typowo powinniśmy otrzymać w studni kwantowej. W ramach projektu będą prowadzone obliczenia kwantowego transportu w celu weryfikacji tej hipotezy. Innym kierunkiem badań będzie zaprojektowanie takiej studni kwantowej, w której nie pojawią się dodatkowe stany brzegowe. W tym celu konieczna jest analiza niezmienników topologicznych, z których wynika ich obecność oraz zrozumienie w jaki sposób można je kontrolować – np. przez dodanie kilku warstw z innego półprzewodnika, w którym te niezmienniki byłyby przeciwne. Półprzewodniki topologiczne mogą także mieć defekty. Jednymi z ciekawszych są stopnie atomowe na powierzchni. Zarówno teoria jak i eksperyment wskazują, że na takich stopniach mogą pojawić się kolejne stany topologiczne – niejako wyższego rzędu. Cechują się one wysoką gęstością stanów, gdyż ich dyspersja staje się płaska gdy zwiększamy ilość warstw układu. Prowadzić to może do spontanicznego złamania symetrii i tworzenia się stanów uporządkowanych. Stany takie z jednej strony mogą generować kolejne stany topologiczne, kiedy na stopniu pojawiają się ściany domenowe, które dają podobne spektrum energetyczne jak stany Majorany. Z drugiej strony większa ilość stopni może prowadzić do efektywnego opisu jak w grafenowych sieciach Moiré, gdzie otrzymuje się niezwykle ciekawe stany magnetyczne i nadprzewodzące.

Półprzewodniki topologiczne mogą być także badane jako układy otwarte, gdzie energia nie jest zachowana, a efektywny opis dany jest Hamiltonianami niehermitowskimi. Dzieje się tak np. gdy umieścimy taki półprzewodnik w rezonatorze fotonowym, gdzie fotony oddziałują ze wzbudzeniami cząstka-dziura w półprzewodniku i tworzy się tzn. kondensat ekscytonowo-polarytonowy. Stan ten także może mieć nietrywialną topologię i interesującym pytaniem jest czy i w jaki sposób może być ona odziedziczona po elektronach z półprzewodnika. Obecnie możliwe jest też tworzenie sieci rezonatorów, gdzie tworzą się pasma polarytonowe, podobne do pasm elektronowych w kryształach. Układy takie mogą mieć unikalne niehermitowskie niezmienniki topologiczne, takie jak odkryta przeze mnie ukryta liczba Cherna w jednym wymiarze, i będą one badane w ramach tego projektu.