

## Popularnonaukowe streszczenie projektu

Jednym z celów, które stawia przed sobą współczesna fizyka jest możliwość manipulacji materią na poziomie kwantowym. Kontrola nad kwantowymi właściwościami materii umożliwiłaby zrewolucjonizowanie wielu dziedzin techniki, chociażby metrologii (pomiar własności pojedynczych atomów czy cząsteczek), energetyki (bezstratny transport energii np. dzięki wysokotemperaturowemu nadprzewodnictwu) czy informatyki (komputer kwantowy, mogący rozwiązywać problemy niedostępne dla konwencjonalnych komputerów). Precyzyjna inżynieria takich własności może stać się możliwa dzięki syntetycznym układom kwantowym, takim jak np. układy kropek kwantowych. Kropki kwantowe to sztuczne obiekty, zachowujące się jak pojedyncze atomy. Precyzyjna kontrola parametrów układu takich kropek (np. ich rozmiaru i wzajemnej odległości) pozwoliłaby na otrzymanie materiału o żądanych właściwościach.

Jednym z fundamentalnych problemów takiej inżynierii jest wrażliwość układów na wpływ otoczenia. Przykładem jest tzw. dekoherencja, czyli wpływ otoczenia niszczący delikatne superpozycje stanów, na których mają opierać się obliczenia dokonywane przez komputer kwantowy. Jednym z pomysłów na pokonanie tej trudności jest wykorzystanie tzw. topologicznych faz materii.

Topologia to abstrakcyjna dziedzina matematyki, którą najprościej zrozumieć jako geometrię bez pojęcia odległości. W topologii obiekty, które można przekształcić w siebie nawzajem w sposób ciągły (np. dysk i sfera) są od siebie nieodróżnialne. Ta perspektywa pozwala uchwycić bardzo ogólne własności obiektów, nie zmieniające się wskutek takich transformacji. Przykładem jest tzw. genus, czyli liczba dziur w obiekcie. Dysk i sfera mają genus równy 0, natomiast torus, którego nie można otrzymać z dysku w sposób ciągły, ma genus równy 1.

W ostatnich latach intensywnie badane jest wykorzystanie topologii w kwantowym opisie materiałów, a dokładnie: znajdujących się wewnątrz nich elektronów. Ich własności topologiczne mają charakter bardzo abstrakcyjny, ale uwidaczniają się w konkretnych zjawiskach fizycznych. Układy topologicznie różne mogą się na pierwszy rzut oka zdawać jednakowe, jeśli patrzymy na ich wnętrza. Różnica uwidacznia się, kiedy zetkniemy te materiały ze sobą, tworząc granicę, na której zmieniają się własności topologiczne – na takiej granicy zachodzą ciekawe zjawiska fizyczne. Granicą taką może być też krawędź materiału, o ile ma on inne własności topologiczne niż otaczająca go próżnia. Materiały takie (a ściślej, stany znajdujących się w nich elektronów) nazywamy topologicznymi fazami materii. Przykładem są odkryte niedawno izolatory topologiczne, których wnętrze jest izolatorem, jednak ich krawędzie przewodzą prąd. Z powodu niewrażliwości na ciągłe deformacje, topologiczne własności materiałów wykazują znaczną odporność na zaburzenia.

W naszych badaniach będziemy rozważać dwa przykłady topologicznych faz materii, charakteryzujących się tzw. silną korelacją. Oznacza to, że do ich opisu potrzebne jest prześledzenie zachowania się wielu elektronów oddziałujących ze sobą. Stanowi to bardzo trudne obliczeniowo zadanie nawet dla superkomputerów, które w większości przypadków potrafią symulować tylko niewielkie układy. Oznacza to, że silnie skorelowane układy kwantowe kryją w sobie jeszcze wiele tajemnic. Ponadto, w silnie skorelowanych fazach topologicznych występuje szereg ciekawych zjawisk fizycznych. Przykładem są tzw. ułamkowe statystyki kwantowe. Statystyka kwantowa określa, jaki efekt dla układu jednakowych cząstek będzie miała wzajemna zamiana dwóch z nich. Wszystkie rzeczywiste cząstki, cechują się jedną z dwóch statystyk: bozonową lub fermionową. Niektóre jednak kwazicząstki (czyli obiekty nie będące prawdziwymi cząstkami, ale zachowujące się w podobny sposób) w silnie skorelowanych fazach topologicznych charakteryzują się zupełnie odmienną, anyonową. Badanie takich zjawisk może poszerzyć nasze zrozumienie podstawowych własności materii.

Nasza praca będzie dotyczyła numerycznej symulacji dwóch silnie skorelowanych topologicznych faz materii: fazy Haldane'a i ułamkowych izolatorów Cherna. Istnienie pierwszej z nich zostało pokazane eksperymentalnie w magnetycznych molekułach. W ramach swojej pracy będę badał inną propozycję jej eksperymentalnej realizacji (w łańcuchu kropek kwantowych), dającą możliwość większej kontroli nad parametrami układu oraz możliwość jego badania metodami optycznymi. Druga z nich jest póki co jedynie koncepcją teoretyczną, postulowaną na podstawie obliczeń dla małych układów. Dotychczas pokazano, że jej najprostszy wariant mógłby przetrwać w układach wystarczająco dużych, aby mogły być badane eksperymentalnie. Przewidziano też optymalne warunki jej występowania. Dla bardziej skomplikowanych (a więc i ciekawszych) wariantów tej fazy takich obliczeń brakuje, i lukę tę postaramy się wypełnić swoją pracą naukową.

Podsumowując, nasze obliczenia mają na celu głębsze zrozumienie silnie skorelowanych faz topologicznych, a jednocześnie pomogą zaobserwować eksperymentalnie ich przewidywane właściwości.