

Kwantowe ciecze spinowe i inne nietrywialne nieskowymiarowe struktury spinowe

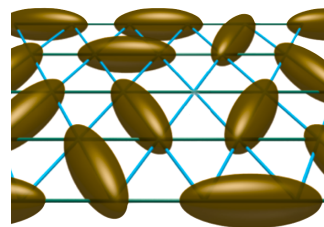
W ostatnich dekadach fizycy zajmujący się materią skondensowaną odkryli nieznaną dotychczas naturę stanów materii. Stanów, które znacznie różnią się od tradycyjnych ciał stałych, cieczy i gazów. Cała materia składa się z elementów składowych, elementarnych, jak elektrony, i złożonych, jak atomy. Gdy wiele z nich spotyka się w materiale, zaczynają oddziaływać. I właśnie te oddziaływania wraz z nieodłączną kwantową naturą tych obiektów, prowadzą do egzotycznych stanów materii.

Wraz ze zmianą temperatury, stan materii zaczyna się zmieniać. Kiedy temperatura jest wystarczająco niska, efekty termiczne zanikają, a kwantowo-mechaniczna natura składników materii zaczyna decydować o własnościach. To jest właśnie ta *terra incognita*, którą dopiero niedawno zaczęliśmy badać. Wykazuje ona nowe rodzaje emergentnego porządku i egzotycznych właściwości związanych z topologią, symetrią, splątaniem, frustracją, frakcjonalizacją, itp. To egzotyczne zachowanie jest szczególnie wyraźne w układach dwuwymiarowych, w których przewiduje się występowanie nietypowych kwazicząstek spełniających statystykę anyonową, inną od dobrze znanych fermionowych i bozonowych. Niska wymiarowość wzmacnia również fluktuacje kwantowe, które mogą uniemożliwić formowanie się dalekozasięgowego porządku przy chłodzeniu układu aż do zerowej temperatury. W efekcie może powstać bardzo ciekawy stan, zwany kwantową cieczą spinową [ang. *quantum spin liquid* (QSL)].

QSL są intrygującą i bardzo atrakcyjną fazą materii ze względu na kilka unikalnych, które sprawiają, że są one istotne zarówno dla badań teoretycznych, jak i potencjalnych zastosowań praktycznych. Reprezentują one stan materii, w którym spiny pozostają w stanie nieuporządkowanym nawet w temperaturze zera absolutnego. Silne splątanie kwantowe obecne w QSL oferuje naturalne miejsce do badania zasad kwantowej teorii informacji. Zrozumienie, w jaki sposób splątanie działa w tych systemach może zapewnić wgląd w kwantową korekcję błędów, entropię splątania i inne podstawowe aspekty mechaniki kwantowej. Nieabelowe anyony, które mogą pojawić się w niektórych QSL, są obiecującymi kandydatami do topologicznych obliczeń kwantowych. Ich nielokalne kodowanie informacji sprawia, że są one z natury odporne na lokalne źródła dekoherencji, co jest głównym wyzwaniem w budowaniu praktycznych komputerów kwantowych.

QSL jest tylko jedną z całego mnóstwa egzotycznych faz, które już są obserwowane lub jedynie teoretycznie przewidywane w dwuwymiarowych układach kwantowych. Jest ich znacznie więcej, ale wszystkie one powstają w wyniku silnych oddziaływań między elektronami. Niestety, pomimo atrakcyjności tych faz, silne oddziaływania sprawiają, że ich teoretyczne badanie jest bardzo trudne. Pomimo, że modele, których używamy do opisu tych układów są dość proste do zapisania, okazują się bardzo skomplikowane do rozwiązania. Poza kilkoma szczególnymi przypadkami nie da się ich rozwiązać analitycznie. Również obliczenia numeryczne są niezwykle trudne: wykładniczo duży rozmiar przestrzeni Hilberta uniemożliwia dokładną diagonalizację, a problem znaku fermionowego czyni kwantowe metody Monte Carlo nieefektywnymi. Jednak szybki wzrost mocy obliczeniowej i rozwój algorytmów obliczeniowych otwiera tu nowe możliwości. W projekcie tym wykorzystamy je poprzez opracowanie i zastosowanie nowych metod obliczeniowych do badania egzotycznych faz kwantowych układów dwuwymiarowych. Jedną z nowatorskich technik, którą wykorzystamy jest nauczanie maszynowe (ang. *Machine Learning*), zaliczane do metod sztucznej inteligencji. Planujemy wykorzystać tę grupę podejść na dwa sposoby: jeden to opracowanie zupełnie nowych metod badania silnie skorelowanych układów kwantowych, a drugi to poprawa efektywności bardziej „tradycyjnych” metod, takich jak kwantowe Monte Carlo. Spodziewamy się, że te nowe i ulepszone metody pozwolą nam badać układy, które do tej pory były poza zasięgiem obecnie dostępnych metod. W szczególności postaramy się odpowiedzieć na kilka ważnych pytań dotyczących natury stanów spinowych w silnie oddziałujących dwuwymiarowych układach kwantowych. Nasze badania skupią się między innymi na materii topologicznej i krytycznych kwantowych cieczach spinowych. Te emergentne stany charakteryzują się dalekozasięgowym splątaniem kwantowym, które może być potencjalnie wykorzystane do realizacji odpornych na zaburzenia obliczeń kwantowych.

Dzięki oparciu naszych teoretycznych badań o wyniki eksperymentów, mamy nadzieję na znaczący postęp w zrozumieniu mechanizmów odpowiedzialnych za niekonwencjonalne zachowanie tych nowych i technologicznie ważnych materiałów.



Rysunek 1: Artystyczna ilustracja fluktuujących wiązań w QSL.