

Streszczenie rozprawy doktorskiej

“Quantum Simulation of Strongly Correlated Phases
in Low-Dimensional Solid-State Systems”

Weronika Pasek

30.09.2025

Zrozumienie silnie skorelowanej materii kwantowej pozostaje jednym z kluczowych wyzwań współczesnej fizyki ciała stałego, ponieważ wiele zjawisk, takich jak nadprzewodniki, ciecze spinowe czy fazy topologiczne, wynika z oddziaływań wykraczających poza możliwości stosowanych powszechnie metod perturbacyjnych. Niniejsza rozprawa bada symulatory kwantowe w układach niskowymiarowych jako alternatywną metodę badania faz skorelowanych.

W pierwszej części pracy analizowane są heterostrukтуры moiré dichalkogenków metali przejściowych, w których potencjał moiré powoduje powstanie sieci zlokalizowanych kropek kwantowych. Ich wzajemne oddziaływanie kontrolowane jest przez kąt skrętu między monowarstwami oraz zewnętrzne pole elektryczne. Wykorzystując metodę dokładnej diagonalizacji oraz efektywny model Hubbarda, pokazujemy, że w takich układach występują fazy silnie skorelowane, takie jak kryształy Wignera oraz polaryzacja spinowa stabilizowana mechanizmem Nagaoki. Rzutując model fermionowy na niskoenergetyczną podprzestrzeń z pojedynczymi obsadzeniami, wyprowadzamy efektywny model spinowy z oddziaływaniem typu ring exchange, który następnie analizowany jest metodą grupy renormalizacji macierzy gęstości. Badanie właściwości stanu podstawowego wykazało, że przy umiarkowanym ekranowaniu dielektrycznym należy on do fazy cieczy kwantowych, natomiast silniejsze ekranowanie sprzyja powstaniu nematycznego stanu valence bond solid.

Druga część pracy skupia się na nanostrukturach grafenowych jako symulatorach kwantowych umożliwiających badanie eksperymentalne właściwości jednowymiarowych układów spinowych. Łącząc trójkątne grafenowe kropki kwantowe składające się z 13 i 22 atomów węgla, tworzymy łańcuchy spinów-1 i spinów- $\frac{1}{2}$, których stan podstawowy należy do topologicznej fazy Haldane’a. Symulacje metodą grupy renormalizacji macierzy gęstości wykazują skończoną przerwę energetyczną, zlokalizowane stany krawędziowe oraz widmo splątania z parzystym stopniem degeneracji, które to właściwości są charakterystyczne dla fazy topologicznej. Zmieniając liczbę buforów o spinie $\frac{1}{2}$ można kontrolować długość korelacji, zbliżając się do limitu wyznaczonego przez stan Afflecka–Kennedy’ego–Lieb’a–Tasakiego. Otwiera to drogę do realizacji eksperymentalnej stanów topologicznych o krótkozasięgowych korelacjach.

Uzyskane wyniki pokazują, że heterostrukтуры moiré oraz łańcuchy nanografenowe stanowią istotne symulatory kwantowe faz skorelowanych i topologicznych. Podkreślają one potencjał nanoskalowych układów elektronowych jako uzupełnienie platform opartych o zimne atomy, rozszerzając symulacje kwantowe na reżimy silnych oddziaływań i skale energetyczne dostępne dla metod eksperymentalnych.