

Abstrakt

Układy kwantowe o silnych sprzężeniach, charakteryzujące się konkurującymi oddziaływaniami, odgrywają kluczową rolę w emergentnych zjawiskach w materiałach kwantowych. Motywowana potrzebą niezawodnych technik symulacyjnych, niniejsza rozprawa rozwija ramy teoretyczne wraz z efektywnymi metodami badania hybrydowych układów kwantowych, takich jak silnie skorelowane układy światło-materia oraz elektron-fonon.

Rozpoczynamy od wyprowadzenia fundamentalnych hamiltonianów opisujących te oddziaływania. Dla układów światło-materia, druga kwantyzacja pola elektromagnetycznego prowadzi do modelu Dickego, który następnie zostaje rozszerzony poprzez włączenie bezpośrednich oddziaływań spin-spin, tworząc model Dicke-Heisenberga. Równolegle wyprowadzony zostaje model Holsteina dla układów elektron-fonon, który jest dalej uogólniany o oddziaływania elektron-elektron, co pozwala uchwycić istotną fizykę konkurujących ze sobą procesów w złożonych materiałach. Bazując na tym modelu teoretycznym, wprowadzamy efektywne techniki numeryczne, polegające na reprezentowaniu bozonowych stopni swobody za pomocą stanów gaussowskich, a następnie niegaussowskich, oraz zastosowaniu metod wariacyjnych, które odgrywają kluczową rolę w hybrydowym podejściu numerycznym. Metoda ta łączy wariacyjny ansatz dla sektora bozonowego z technikami numerycznymi dla układów wielociłowych zastosowanych do komponentów fermionowych i spinowych, umożliwiając precyzyjne symulacje układów o silnych sprzężeniach.

Opracowana metoda jest następnie stosowana w obu obszarach. Dla układów elektron-fonon zaproponowana jest również platforma symulacji kwantowych, a hybrydowa metoda numeryczna jest weryfikowana na modelu Hubbard-Holsteina, stanowiąc punkt wyjścia do rozszerzenia jej na bardziej złożone scenariusze. Dla układów światło-materia systematycznie badany jest rozszerzony model Dicke-Heisenberga, aby wyjaśnić współdziałanie oddziaływań spin-foton i spin-spin oraz doprecyzować warunki leżące u podstaw nadpromienności i uporządkowania magnetycznego. Podsumowując, niniejsza rozprawa dostarcza jasnych i wszechstronnych ram do badania współdziałania konkurencyjnych oddziaływań w hybrydowych układach kwantowych, mając bezpośrednie zastosowanie zarówno dla analizy teoretycznej, jak i projektowania eksperymentalnego materiałów kwantowych.