

Dynamika dwuskładnikowych gazów kwantowych

Zjawiska magnetyczne odgrywają znaczną rolę zarówno w życiu codziennym, jak i w świecie naukowym. Poczynając od silników elektrycznych czy magnetofonów, a kończąc na ciekłym helu-3 i materii kwarkowej wewnątrz gwiazd neutronowych, stanowią one jedną z najciekawszych manifestacji podstawowych praw przyrody. Tzw. ferromagnetyki wędrówne, takie jak żelazo czy nikiel, charakteryzują się uporządkowaniem spinów elektronów, jednakże nie w sposób zlokalizowany, jak na przykład w kryształach, lecz są zdelokalizowane, podobnie do elektronów odpowiedzialnych za przewodnictwo.

W czasach fizyki klasycznej, ferromagnetyzm nie został satysfakcjonująco wyjaśniony i pozostał nierozwiązaną zagadką. Dopiero z nadejściem mechaniki kwantowej został on skutecznie opisany w języku spinu, oddziaływania wymiennego i odpychania Pauliego pomiędzy nierozróżnialnymi cząstkami. Było to niewątpliwie zwycięstwo świata naukowego, jednakże okazało się pyrrusowe – ówczesni fizycy nie byli w stanie użyć swoich modeli do opisu powszechnie używanych materiałów w sposób ilościowy. Z jednej strony, ich uproszczone metody nie były w stanie uchwycić kluczowych elementów skomplikowanych układów dostępnych doświadczalnikom, a z drugiej – metody umożliwiające analizę silnie skorelowanych układów nie były jeszcze dostępne. Jednakże, te podstawowe modele stały się bardzo dokładnym narzędziem do badania układów, które pojawiły się wraz z pierwszym schłodzeniem gazu do reżimu kwantowego. W takich układach elektrony są zastąpione przez bardzo rozrzedzony gaz atomowy, w którym swobodnie poruszające się cząstki zderzają się tylko czołowo. Gdy to efektywnie odpychające oddziaływanie staje się wystarczająco silne, cząsteczki o przeciwnych spinach zaczynają zajmować odmienne położenia w przestrzeni, przejawiając porządek ferromagnetyczny.

W latach 30. XX w. stan wiedzy prezentował się następująco – próbki doświadczalne były zbyt skomplikowane, aby można je było dokładnie opisać, a teoria odnosiła się do układów, które były niezwykle trudne do przygotowania. Problem ten próbowano zaatakować z obu stron, jednakże dostępność wystarczająco szybkich komputerów pozwalających na analizę silnie skorelowanych układów, została wyprzedzona przez wytworzenie kwantowo zdegenerowanego gazu w 1995 roku. Eksperymenty te pozwoliły na realizację układów, do których proste modele znajdują zastosowanie.

W tym przypadku, standardową strategią doświadczalną jest wytworzenie zrównoważonej mieszaniny dwóch najniższych stanów nadsubtelnych jakiegoś atomu, np. litu-6, i umieszczenie ich w potencjale pułapkującym. Matematycznie, taka struktura jest analogiczna do algebry opisującej spin połówkowy, co sprowokowało użycie terminu *pseudospin* do jej opisu. Jednakże, w przeciwieństwie do elektronów, zmiana znaku pseudospinu pomiędzy atomami jest zabroniona. W rezultacie, całkowita magnetyzacja próbki znika, a manifestacją porządku ferromagnetycznego jest wytworzenie się przestrzennych struktur domenowych.

W późnych latach 2000, doświadczenia, które miały na celu analizę niestabilności magnetycznej w takiej odpychającej się mieszaninie musiały się borykać z problemem konkurencyjnej niestabilności występującej w tym układzie – tworzenia się molekuł. Zaskakująco, nawet w typowym przypadku odpychającego dwuskładnikowego gazu Fermiego, stan podstawowy nie jest ferromagnetyczny, lecz jest mieszaniną sparowanych atomów o przeciwnych spinach w stanie nadciekłym. Wynika to z faktu, że kontaktowe oddziaływanie pochodzące od rezonansu Feshbacha posiada przyciągającą część ze słabo związanym stanem molekularnym. Niestety, im większa wartość oddziaływania, tym szybciej przebiega tworzenie się molekuł. We wczesnych eksperymentach okazało się, że w reżimie oddziaływań, dla których niestabilność Stonera była przewidywana, formowanie się molekuł było dominującym zjawiskiem i powstrzymało tworzenie się domen.

Aby obejść ten problem, florencka grupa kierowana przez Giacomo Roatiego, stworzyła układ, w którym początkowy stan posiada sztucznie wytworzone domeny. Oba składniki gazu fermionowego są rozdzielone przy pomocy cienkiej bariery optycznej, zmniejszając przekrycie pomiędzy składnikami do zera. Taka geometria znacząco redukuje formację molekuł, pozwalając na pojawienie się porządku ferromagnetycznego w układzie. Właściwości magnetyczne są badane przy pomocy analizy oscylacji, które pojawiają się po opuszczeniu bariery.

W ramach mojej rozprawy doktorskiej współtworzyłem zunifikowany model pozwalający na badanie zarówno statyki, jak i dynamiki odpychających się gazów Fermiego w pułapce harmoniczej. Został on z sukcesem zastosowany do opisu eksperymentu, wykazując świetną z nim zgodność. Bazowy model został także wykorzystany do opisu małych drgań ww. układu, a także zmodyfikowany do opisu mieszaniny bozonowo-fermionowej. Ponadto, w ramach moich badań, analiza układów fermionowych doprowadziła do wprowadzenia pojęcia tzw. fermionowych dywanów kwantowych. Kolejnym kierunkiem prowadzonych badań jest niestabilność ferromagnetyczna w niskowymiarowych układach, ze szczególnym naciskiem na przejście pomiędzy układem dwu- a trójwymiarowym. Cel dodatkowy stanowi próba dynamicznego opisu konkurencyjnego tworzenia się antykorelacji (czyli porządku ferromagnetycznego) i korelacji (czyli parowania się fermionów w molekuły) w układzie przygotowanym przez florencką grupę, co nie zostało jeszcze nigdzie w satysfakcjonujący sposób zaproponowane.