

Generowanie silnie skorelowanych stanów nieoddziałujących bozonów na potrzeby metrologii kwantowej

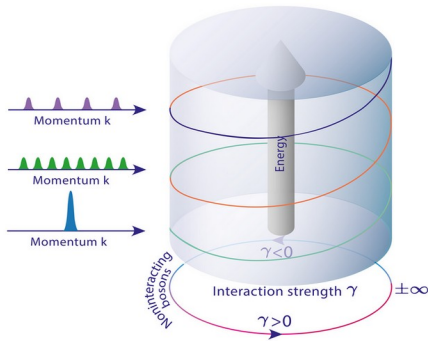
Maciej Marciniak^{1†}, Grigori E. Astrakharchik², Krzysztof Pawłowski¹, Bruno Juliá-Díaz³

¹Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Polska

²Departament de Física, Universitat Politècnica de Catalunya, E-08034 Barcelona, Hiszpania

³Departament de Física Quàntica i Astrofísica, Facultat de Física, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Hiszpania

†email: mmarcinaik@cft.edu.pl



Rysunek 1: Schemat procesu pompowania topologicznego oraz wynikowy rozkład pędów atomów w układzie.

Wśród kluczowych dla rozwoju fizyki przełomów w XX wieku, z całą pewnością można wymienić odkrycie fermionów i bozonów. Zasada Pauliego, będąca bezpośrednią konsekwencją antysymetryzacji funkcji falowej fermionów, prowadzi do charakterystycznej struktury stanu podstawowego – fermiony zajmują kolejne poziomy energetyczne aż do energii Fermiego. Bozony z kolei mają tendencję do skupiania się na jednym poziomie energetycznym, co znane jest jako wzmacnienie bozonowe. Silnie skorelowane stany bozonowe nie występują naturalnie, ale mogą być generowane za pomocą odpowiednich protokołów. Dla generowania tychże korelacji kluczowe są oddziaływania między bozonami. Niestety, są one często niepożądane w zastosowaniach praktycznych, na przykład w metrologii.

Mimo fundamentalnych różnic między bozonami a fermionami, istnieje układ fizyczny, w którym można je powiązać za pomocą eleganckiego odwzorowania. Połączenie to występuje w jednowymiarowym kwantowym układzie wielociałowym z krótkozasięgowymi oddziaływaniami modelowanymi za pomocą modelu Lieb-Linigera. W przypadku nieskończonego silnego odpychania między bozonami, tzw. granicy Tonksa-Girardeau'a lub fermionizacji, stany własne układu bozonów mogą zostać odwzorowane przez stany własne nieoddziałujących fermionów. Energie i korelacje oparte na gęstości są identyczne w obu układach. Podobieństwa te wynikają z silnego krótkozasięgowego odpychania, które uniemożliwia bozonowi zajmowanie tej samej pozycji co inny, co imituje efekt zakazu Pauliego dla fermionów. Kolejna osobliwość pojawia się, gdy znak siły oddziaływania zostaje gwałtownie odwrócony – z silnego odpychania do silnego przyciągania, na przykład poprzez wykorzystanie rezonansów Feshbacha. Stan bozonowy przechodzi wówczas do tzw. stanu super-Tonksa-Girardeau (sTG), który pozostaje metastabilny mimo silnego przyciągania między atomami, co zostało pokazane zarówno teoretycznie [1], jak i eksperymentalnie [2,3]. Jak pokazano w pracy [3], stan sTG może zostać wykorzystany do *pompowania* układu bozonów ze stanu podstawowego do stanów wzbudzonych, co przedstawiono schematycznie na Rys 1. W protokole tym, siła oddziaływania jest najpierw płynnie zwiększana od $g=0$ (nieoddziałujące bozony) aż do granicy fermionizacji. Następnie następuje nagłe przeskalowanie siły oddziaływania do wartości ujemnych, co przenosi gaz do metastabilnego reżimu sTG z $g \rightarrow -\infty$. Po tym następuje kolejny etap adiabatycznej dynamiki – płynny powrót siły oddziaływania do zera, kończący pierwszy cykl. Pomimo nagłych zmian interakcji, przejścia między stanami są ciągłe, prowadząc układ ku coraz wyższym stanom energetycznym.

W ramach niniejszego projektu pokazujemy, że pompownie może zostać użyte do osiągnięcia skorelowanych stanów nieoddziałujących bozonów. W szczególności, stany pojawiające się po n -tym cyklu pompownia składają się z pojedynczych bozonów obsadzających co $2n$ -ty poziom energetyczny aż do energii Fermiego pomnożonej przez $2n$. W szczególnym przypadku układu z periodycznymi warunkami brzegowymi, rozkład pędu tych stanów jest dokładnie taki sam jak dla nieoddziałujących fermionów, ale uwięzionych w układzie o $2n$ razy mniejszej długości – patrz Rys 1. Ich energia kinetyczna jest dokładnie n^2 razy większa niż w stanie podstawowym nieoddziałujących fermionów. W konsekwencji, również funkcja korelacji pierwszego rzędu tych nieoddziałujących stanów bozonowych na krótkich odległościach przypomina funkcję korelacji fermionów. Czyni to rzeczony stany interesującym kandydatem do zastosowania jako medium dla metrologii kwantowej.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania finansowane są ze środków przyznanych w ramach grantu NCN Sonata BIS No. 2019/34/E/ST2/00289.

Literatura

- [1] G.E.Astrakharchik et al., Physical Review Letters 95, 19 (2005)
- [2] E. Haller et al., Science 325, 5945 (2009),
- [3] W.Kao et al., Science 371, 6526 (2021)