



PHD TÉZISFÜZET

**Korrelációk és dinamika  
kölcönható hideg atomi  
rendszerekben**

LOVAS IZABELLA

TÉMAVEZETŐ: DR. ZARÁND GERGELY  
*Egyetemi tanár*  
BME Fizikai Intézet  
Elméleti Fizika Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
2018

# Bevezetés

A kísérleti technikák gyors fejlődése az elmúlt évtizedekben új lehetőségeket nyitott az erősen korrelált hideg atomi rendszerek vizsgálatára. Ez az áttörés vezetett a Bose-Einstein kondenzátumok és a degenerált Fermi gázok kísérleti megvalósításához [Anderson et al., 1995, Davis et al., 1995, DeMarco et al., 1999], és lehetővé tette, hogy ezeket a gázokat kvázi egy- és kétdimenziós geometriákban [Görlitz et al., 2001, Paredes et al., 2004, Kinoshita et al., 2004] vagy optikai rácsokban [Greiner et al., 2002] csapdázzák. A csapdázó potenciál feletti precíz kontroll mellett mágneses terek segítségével az atomok közötti kölcsönhatás is hangolható [Bloch et al., 2008]. Ennek köszönhetően mára ezek a rendszerek kvantum szimulátorként használhatók, és lehetővé teszik a különböző kvantumfázisok korrelált struktúrájának, illetve nem-egyensúlyi állapotokban a korrelációk terjedésének részletes vizsgálatát [Bloch et al., 2008, Polkovnikov et al., 2011, Eisert et al., 2015, Langen et al., 2013]. A kísérleti módszerek fejlődése növelte az elméleti érdeklődést az erősen korrelált egyensúlyi fázisok és az izolált kvantumrendszerek nem-egyensúlyi dinamikája iránt. A hideg atomi rendszerek nem-egyensúlyi viselkedésének vizsgálata olyan alapvető kérdéseket vetett fel, mint a zárt kvantum rendszerek statisztikus fizikai leírása, és fényt derített a szoros kapcsolatra, mely ezt a korrelációk terjedéséhez fűzi [Deutsch, 1991, Rigol et al., 2008].

A hideg atomi kísérletek által ösztönzött fejlődés ellenére a korrelált rendszerek részletes elméleti vizsgálata ma is nehéz feladat, és sok kérdés megválaszolhatlan maradt, különösen a nem-egyensúlyi viselkedéssel kapcsolatban. Ezen komplex rendszerek jobb megértése érdekében doktori munkám során különböző, egyensúlyi és nem-egyensúlyi hideg

atomi rendszerek korrelált struktúrájának vizsgálatával foglalkoztam.

## Célkitűzések

Első munkámban a kölcsönhatás okozta kvantumfluktuációk, a részecskeszám-megmaradás és a csapdázó potenciál összjátékából származó egyensúlyi korrelációkat akartam jobban megérteni, mely fontos lehet a csapdázott, zárt hideg atomi rendszerek leírásához. Ennek érdekében megvizsgáltam egy csapdázott kölcsönható Bose-gáz egyensúlyi struktúráját, és részletesen elemeztem a rendszer impulzus korrelációit.

Második célként meg szerettem volna mutatni, hogy a hideg atomi rendszerek vizsgálatára legáltalánosabban alkalmazott kísérleti eszköz, a repülési idő kísérlet, a korábban használnál jóval részletesebb információt tartalmaz a kvantum rendszerek állapotáról, egyensúlyi és nem-egyensúlyi esetekben egyaránt.

Harmadik célként jobban meg szerettem volna érteni az összefonódási entrópia keletkezését sokrészecske rendszerekben. Ennek érdekében meg szerettem volna vizsgálni az összefonódási entrópia produkciót egy egyszerű, kísérletileg megvalósítható hideg atomi rendszerben.

Végül arra kerestem a választ, mi történik azzal a koherenciával, melyet egy koherensen mozgó részecske ad át eredetileg teljesen rendezetlen környezetének. Meg szerettem volna mutatni, hogy egyetlen részecske is jelentős korrelációkat építhet ki környezetében, ellentétben azzal a gyakori feltevessel, miszerint ez a koherencia gyorsan eltűnik a környezet számos szabadsági foka miatt.

## Módszerek

A különböző hideg atomi rendszerek egyensúlyi korrelációinak és nem-egyensúlyi dinamikájának tanulmányozásához analitikus megfontolásokat és numerikus számításokat kombináltam. Az alacsony dimenziós Bose-Einstein kondenzátumokat a Luttinger-folyadék elmélet keretein belül, illetve a részecskeszám-megőrző Bogoljubov-közelítés alkalmazásával vizsgáltam. Különböző rendszerek nem-egyensúlyi dinamikájának tanulmányozása során egzakt diagonalizációt használtam, kiegészítve egy szemi-klasszikus közelítés eredményeivel, illetve egy valós idejű Monte Carlo szimulációt is alkalmaztam.

## Új tudományos eredmények

Fő eredményeimet az alábbi tézispontokban foglaltam össze.

1. Egy két dimenziós, harmonikusan csapdázott, kölcsönható Bose-gáz impulzus-eloszlását vizsgálva megmutattam, hogy az egymódusú kondenzátum és a nemkondenzált felhő közötti koherens részecske-átmenetek következtében a  $\mathbf{k}$  és  $-\mathbf{k}$  hullámszámú részecskék között antikorrreláció alakul ki a  $|\mathbf{k}| \sim 1/R_c$  tartományban, ahol  $R_c$  a kondenzátum tipikus kiterjedése. Ezzel szemben  $|\mathbf{k}| \gg 1/R_c$  hullámszámokra visszakaptam a homogén kondenzátum Bogoljubov-közelítése által jóslott gyenge pozitív korrelációkat.

Az eredményeket a [1] cikkben publikáltam.

2. A kitáguló gáz sűrűségprofiljának teljes eloszlásán alapuló új módszert javasoltam a kvantumállapotok jellemzésére, melyet egy 1 dimenziós kvázikondenzátu-

mon demonstráltam. Megmutattam, hogy alapállapotban a távolabb megfigyelhető, véges impulzusú gerjesztések egy exponenciális és Gamma eloszlás közötti átcsapáshoz vezetnek a momentum felbontás csökkenésekor. Ezzel szemben a kvázikondenzátum fluktuációit tükröző nulla impulzusú részecskék eloszlása Gumbel eloszlást követ, mely kis véges hőmérsékleten is megfigyelhető marad. Megmutattam, hogy a módszer kvantum kvencseket követő (pre-)termalizációs folyamatok vizsgálatára is alkalmas.

Ezeket az eredményeket a [2] cikkben publikáltam.

3. Két csatolt Bose-Einstein kondenzátum összefonódási entrópiájának időfejlődését vizsgálva egy kétfenekű potenciálban, megmutattam, hogy rövid időskálákon a folyamatos entrópia produkción felül az entrópia oszcillál, tükrözve a kondenzátumok koherens oszcillációit. Bár egyensúlyi állapot nem alakul ki, hosszabb időskálákon az entrópia stacionáriussá válik. Megmutattam, hogy ez a szaturált érték tükrözi a rendszer öncsapdázó dinamikus fázisátalakulását, és megérthető egy klasszikus mikrokanonikus leírás alapján.

Az eredményeket a [3] cikkben publikáltam.

4. Részt vettem egy két dimenziós, nem-kölcsönható, teljesen rendezetlen, végtelen hőmérsékletű spinkörnyezetben mozgó lyuk nem-egyensúlyi dinamikájának vizsgálatában, megmutatva, hogy a lyuk hosszú életű korrelációkat épít ki a környező spinek között. Megmutattam, hogy a dinamika megérthető a lyuk lehetséges véletlen pályáinak, és a spinek pálya menti átrendeződésének vizsgálatával. Beláttam, hogy a teljes spin megmaradása miatt a spinkorrelációk egy összeg-

szabályt teljesítenek, így mind ferromágneses, mind antiferrromágneses korrelációk kialakulnak.

Az eredményeket a [4] cikkben publikáltam.

## Publikációk

Tézisponthoz kapcsolódó tudományos közlemények:

- [1] Izabella Lovas, Balázs Dóra, Eugene Demler, and Gergely Zaránd, *Quantum-fluctuation-induced time-of-flight correlations of an interacting trapped Bose gas*, Phys. Rev. A **95**, 023625 (2017).
- [2] Izabella Lovas, Balázs Dóra, Eugene Demler, and Gergely Zaránd, *Full counting statistics of time-of-flight images*, Phys. Rev. A **95**, 053621 (2017).
- [3] Izabella Lovas, József Fortágh, Eugene Demler, and Gergely Zaránd, *Entanglement and entropy production in coupled single-mode Bose-Einstein condensates*, Phys. Rev. A **96**, 023615 (2017).
- [4] Márton Kanász-Nagy, Izabella Lovas, Fabian Grusdt, Daniel Greif, Markus Greiner, and Eugene A. Demler, *Quantum correlations at infinite temperature: The dynamical Nagaoka effect*, Phys. Rev. B **96**, 014303 (2017).

További publikáció:

- [5] Balázs Dóra, Izabella Lovas, and Frank Pollmann, *Distilling momentum-space entanglement in Luttinger liquids at finite temperature*, Phys. Rev. B **96**, 085109 (2017).

## Hivatkozások

- [Anderson et al., 1995] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
- [Bloch et al., 2008] I. Bloch, J. Dalibard and W. Zwerger, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 885 (2008).
- [Davis et al., 1995] K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
- [DeMarco et al., 1999] B. DeMarco, and D. D. Jin, *Science* **285**, 1703 (1999).
- [Deutsch, 1991] J. M. Deutsch, *Phys. Rev. A* **43**, 2046 (1991).
- [Eisert et al., 2015] J. Eisert, M. Friesdorf, and C. Gogolin, *Nat. Phys.* **11**, 124 (2015).
- [Görlitz et al., 2001] A. Görlitz, J. M. Vogels, A. E. Leanhardt, C. Raman, T. L. Gustavson, J. R. Abo-Shaer, A. P. Chikkatur, S. Gupta, S. Inouye, T. Rosenband and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 130402 (2001).
- [Greiner et al., 2002] M. Greiner, M. O. Mandel, T. Esslinger, T. Hänsch, and I. Bloch, *Nature* **415**, 39 (2002).
- [Kinoshita et al., 2004] T. Kinoshita, T. Wenger, and D. S. Weiss, *Science* **305**, 1125 (2004).
- [Langen et al., 2013] T. Langen, R. Geiger, M. Kuhnert, B. Rauer, and J. Schmiedmayer, *Nat. Phys.* **9**, 640 (2013).

- [Paredes et al., 2004] B. Paredes, A. Widera, V. Murg, O. Mandel, S. Fölling, J. I. Cirac, G. V. Shlyapnikov, T. W. Hänsch, and I. Bloch, *Nature* **429**, 277 (2004).
- [Polkovnikov et al., 2011] A. Polkovnikov, K. Sengupta, A. Silva, and M. Vengalattore, *Rev. Mod. Phys* **83**, 863 (2011).
- [Rigol et al., 2008] M. Rigol, V. Dunjko, M. Olshanii, *Nature* **452**, 854 (2008).