

Kvantumoptikai és kvantuminformatikai hálózatok nemklasszikus tulajdonságai

Záójelentés az OTKA-NKFI K83858 sz. kutatási pályázatról

2011-2015

Összefonódás kaotikus dinamikája qubitek rendszerében

Az összefonódást tisztító protokollok esetében egy sokaságból a sokaság egy részén végzett mérések eredménye szerint válogatva egy kisebb sokasághoz jutunk, amelyben a kvantummechanikai összefonódottság megnövekedett. A mérésekkel kondicionált dinamika nemlineáris lesz, eltérően a megszokott Hamiltoni rendszerektől. Korábbi eredményünk szerint, a hasonló elven, de csupán egy qubitek megvalósítható iteratív, kondicionális dinamika kaotikus viselkedéshez vezethet. Az így létrejövő komplex káosz valódi, exponenciális érzékenységet mutat a kezdőállapokra, de különbözik a klasszikus determinisztikus káosztól, mivel itt a természetes leírás nem egy valós fázistéren, hanem egy komplex téren történik.

Sikerült bebizonyítanunk, hogy a kaotikus viselkedés megjelenik egy két qubites rendszerben, mégpedig közvetlenül az összefonódottságot leíró mennyiség viselkedésében. Ez azt jelenti, hogy ha a lehetséges kezdőállapotok alkotta síkot aszerint színezzük, hogy az adott kezdőállapot aszimptotikusan milyen típusú állapotokhoz tart, akkor két színt használhatunk: egyet a teljesen összefonódott és egyet a szeparálható, azaz teljesen összefonódottság-mentes aszimptotikus állapotokra. A két szín fraktálszerű szigeteket alkot, amelyek tetszőlegesen finom skálán változhatnak. Zaj hozzáadása esetén egy harmadik típusú, kevert aszimptotikus viselkedés is megjelenhet. [1]

Megmutattuk, hogy kvantumos rendszerek esetén a kezdeti feltételekre való érzékenység szükséges feltétele a vizsgált sokaság méretének gyors csökkenése a dinamika során, erre éles kvantitatív feltételt is sikerült adni. A nemlineáris protokoll kísérleti megvalósítására egy viszonylag egyszerű optikai sémát javasoltunk, ami jelenleg elérhető eszközökkel a dinamika néhány lépését demonstrálná. Az egy qubites protokoll részletes analízisével bebizonyítottuk, hogy létezik olyan paraméterérték, amellyel a dinamika bármely kezdőállapot esetén érzékeny lesz a kezdeti feltételekre, szemben az eddig ismert fraktál halmazokkal, amelyek a kezdőállapotok terében null mértékű halmazt alkotnak. [2]

Kvantumos bolyongások viselkedése

A kvantumos bolyongások fontos szerepet játszanak a kvantuminformatika elméletében és több új kísérletben is sikerült demonstrálni egyszerű bolyongásokat, például optikai elrendezésben.

Kvantumos bolyongás ugrásokkal

Egy speciális típusú egydimenziós bolyongást elemeztünk, egy optikai multiport elrendezésben. A diszkrét idejű bolyongást ebben az esetben egy passzív kvantumoptikai elrendezés valósítja meg. A passzív elemeket összekötő utakat egy konnektivitási mátrix írja le. Ha az elrendezésben véletlenszerűen, például valamilyen hiba folytán, nem csak közvetlen szomszédok között létesül összeköttetés, akkor a kialakuló rendszer dinamikája nyílttá válik. Modellünkben véges valószínűséggel jelenhet meg egy távolabbi hellyel való összeköttetés. Két helyzetet tanulmányoztunk: egyik esetben statikus a rendezetlenség, míg a másik esetben időlépésenként az előzőtől független, új konnektivitási mátrixot használunk. A két eset fundamentálisan különböző dinamikai viselkedést mutat, a dinamikus esetben Gauss eloszlást találunk hely szerint, míg statikus rendezetlenség esetén az ugrás méretének paritásától függően két a esetet kapunk. Az ugrás méretét páros hosszúra választva három csúcs jelenik meg a valószínűség-eloszlásban a kezdeti, lokalizált pozíció körül. Páratlan hosszúságú ugrás esetén a hely szerinti valószínűségeloszlás diszkrét Laplace-eloszláshoz hasonlít, melyet hosszú idő után további (exponenciális jellegű) csúcsok modulálnak. Numerikus eredményeink szerint a hosszú idejű határesetben az eloszlás szórását, egy megfelelő leképezés segítségével, univerzális függvénnyel adhatjuk meg. [3]

Irány szerinti korrelációk két részecskés bolyongásban

Egy dimenzió esetén azt találtuk, hogy két részecskés bolyongásoknál az irány szerinti korrelációk nem növelhetők a részecskék nemklasszikus tulajdonságait használva. Beláttuk viszont, hogy delta kölcsönhatás esetén már átléphető a klasszikus küszöb. [4]

Diszkrét idejű bolyongás perkolációs rácsokon

Diszkrét idejű bolyongás viselkedését vizsgáltuk dinamikus perkolációs gráfokon. A véletlenszerűen változó gráf egy speciális nyílt kvantumrendszerhez vezet, ez a probléma numerikusan nehezen kezelhető. Sikerült analitikus eszközökkel meghatározni az aszimptotikus viselkedést és kimutatni, hogy nem csak teljes keveredés jöhet létre, de megjelenhetnek aszimptotikusan oszcilláló állapotok is. [5]

A gráfokon történő kvantumos bolyongások alkalmasak fizikai folyamatok

modellezésére és egyben a kvantuminformáció-elmélet hatékony eszközei. Ha a bolyongáshoz kapcsolódó gráf összeköttetéseit véletlenszerűen megváltoztatjuk, akkor megváltoznak annak a transzport tulajdonságai is, ez az ún. perkoláció problematikája. A diszkrét idejű kvantumos bolyongások esetében a gráf dinamikus megváltoztatása (dinamikus perkoláció) egy speciális típusú hibát okoz a rendszerben. A dinamikus perkoláció esetében a rendszer időfejlődése során az egyes időlépésekben a gráf összeköttetése véletlenszerűen eltűnhetnek illetve megjelenhetnek. Az így létrejövő időfejlődés tulajdonképpen egy speciális nyílt rendszer dinamikára vezet, amelyben a hosszútávú viselkedés közvetlen numerikus módszerekkel általában nehezen kezelhető. Ezért olyan új, a véletlen unitér leképezéseken alapuló aszimptotikus módszereket felhasználó analitikus módszert dolgoztunk ki, amelyek explicit módon meghatározzák a kétdimenziós véges egész rácsokon történő kvantumos bolyongások aszimptotikus (hosszú idejű) dinamikáját perkoláció jelenlétében. Részletesen tárgyaltuk az egydimenziós perkolációs gráfokon történő kvantumos bolyongások esetét a legáltalánosabb $SU(2)$ érmeoperátort tekintve. Olyan új és nemtriviális effektusokat találtunk, mint a (kvázi)periodikus oszcillációk, illetve az exponenciálisan lokalizált élállapotok. Kétdimenziós rendszerek esetében megmutattuk, hogy az aszimptotikus határesetben csapdázódás (lokalizáció) illetve az irány-szimmetria sértése léphet fel. [6]

Erősen csapdázott kétdimenziós kvantumos bolyongások

A diszkrét idejű kvantumos bolyongások a véletlen bolyongások nemtriviális általánosításai, melyek széleskörű alkalmazási lehetőségekkel rendelkeznek. Ezen belül különböző kvantumrendszerek szimulációjának, illetve megvalósításának alappilléreként is szolgálhatnak. A diszkrét idejű kvantumos bolyongások általában ballisztikusan terjednek pontosan a kvantumos jellegük miatt. Bizonyos esetekben azonban lokalizálódhatnak (csapdázódnak) a kezdeti állapotukban. Ezt, illetve a kvantumos bolyongások egyéb alapvető jelenségeit, az érmeoperátor megválasztása határozza meg. Megvizsgáltuk és elemeztük azon bolyongásokat, amelyekben az erős csatoláshoz vezető érmeoperátorok osztályát használtuk, ezáltal kiegészítettük az ismert bolyongások listáját. Ezekben a rendszerekben olyan érdekes jelenségekre is rámutattunk, amelyek a fényimpulzusok egy adott közegben történő csapdázásától a topologikus effektusokon át a kvantumos keresésig számos felhasználási lehetőséget rejtenek magukban. [7]

Diszkrét idejű kvantumos bolyongások entrópia-rátája

A diszkrét idejű szochasztikus folyamatok egy adott lépésében generált információ mennyiségének mértéke az ún. entrópia-ráta. Kutatásaink során megvizsgáltuk, hogy mi a különbség a diszkrét idejű kvantumos illetve klasszikus bolyongás entrópia-rátája között. Analitikus módszereket dolgoztunk ki ezek kiszámítására és

közelítésére vonatkozóan. Ilyen módon következtetéseket tudunk levonni a klasszikus sztochasztikus valamint a kvantumos folyamatok közötti különbségekre vonatkozóan a klasszikus információ-elmélet vonatkozásában. [8]

Folytonos idejű kvantumos bolyongások perkolációs rácsokon

Megvizsgáltuk a folytonos idejű kvantumos bolyongások időfejlődését véletlenszerűen változó gráfokon. Ebben a modellben adott időközönként a gráf egyes éleit egymástól függetlenül egy adott valószínűség szerint elveszük vagy megtartjuk a perkolációnak megfelelően. A rendszert abban az esetben vizsgáltuk amikor ez a zaj erős, azaz amikor a gráf két megváltozása között eltelt időtartam nullához tart. Ekkor azt találtuk, hogy a perkoláció hatása az idő átskálázásában jelentkezik: függetlenül a gráf struktúrájától és a bolyongás kezdeti állapotától, az idő az egy él megtartását jellemző valószínűség szerint skálázódik.

Tanulmányoztuk mind egy adott rendszer időfejlődését, mind pedig az így kapott összes lehetséges trajektóriára átlagolt dinamikát a szuperoperátoros formalizmus segítségével. Elméleti modellünket analitikusan bizonyítottuk, valamint különböző gráfok esetén numerikus szimulációk segítségével is alátámasztottuk. Ezen felül megvizsgáltuk a véges lépésköz alkalmazásának hatását is a rendszer időfejlődésére. [9]

Folytonos idejű kvantumos bolyongások transzporttulajdonságai Sierpinski fraktálokon

A folytonos idejű kvantumos bolyongás segítségével modelleztük a kvantumtranszport hatékonyságát determinisztikus Sierpinski fraktálokon, nevezetesen a Sierpinski-háromszögön, a Sierpinski-szőnyegen, és ezen gráfok duálisain. A transzport hatékonyságát az egzakt és átlagos visszatérési valószínűséggel, valamint a csapdák jelenlétében számolt átlagos túlélési valószínűséggel jellemeztük. A Sierpinski-háromszög esetén a lokalizáció már kis méretű gráf (kis generáció) esetén is megmutatkozott. A Sierpinski-szőnyeg esetén a numerikus szimulációval kapott eredmények mutattak lokalizációra utaló tendenciát, de csak nagy rendszer esetén. A Sierpinski-háromszög és a Sierpinski-szőnyeg esetén kapott eredmények továbbá jól mutatták, hogy a klasszikus folytonos idejű bolyongások esetén széles körben alkalmazott spektrál dimenzió a kvantumos esetben nem ad pontos leírást a kvantumos bolyongás időfejlődéséről. [10]

Visszatérés a kezdeti állapotba dekoherens bolyongásokban

Egy általános, dekoherens kvantumcsatornát ismételten hattatva egy általánosított bolyongáshoz jutunk. Ha minden időlépés után megmérjük, hogy a rendszer visszatért-e a kezdeti állapotába, akkor definiálhatjuk az átlagos visszatérési időt.

Erről tudjuk, hogy mind a klasszikus, mind a zárt kvantum (unitér) esetben egész értékű átlagos visszatérési időkhöz vezet. Sikerült megmutatnunk, hogy ez a tulajdonság bizonyos nyílt csatornák esetére is igaz, ennek feltétele, hogy a csatorna unitális legyen. Néhány példán illusztráltuk, hogy a csatorna jellegét minimálisan módosítva ugrás történik az átlagos visszatérési időben. [30]

Kvantumos bolyongások kísérleti megvalósítása

Dekoherencia és rendezetlenség kvantum bolyongásokban: ballisztikus terjedés és lokalizáció

Egy optikai visszacsatoláson alapuló kvantum bolyongás megvalósítása szabályozható kvantumérmével, melynek segítségével a kvantum bolyongó dinamikája helytől, illetve időtől függően változtatható. Különböző hely-, illetve időfüggéseket programozva a szabályozást megvalósító elektro-optikai modulátorba, egyaránt megfigyeltünk dekoherencia-, valamint dinamikai lokalizációs jelenségeket. A fenti kísérletet sikeresen megvalósító csoporttal közvetlenül együttműködtünk. [11]

Többdimenziós kvantum bolyongás megvalósítása fotonikus kísérletben

A többdimenziós kvantum bolyongások nem triviális topológiájuk folytán alkalmasak komplex kvantuminformaticai és transzport jelenségek szimulálására. A velünk együttműködő kísérleti csoport visszacsatolt, fotonikus elrendezésben implementált egy 2D kvantum bolyongást. 12 lépést és 169 pozíciót használó bolyongást valósított meg, optikai szálakból álló hálózatot alkalmazva. [12]

Önfokuszáló nyalábok

A kvantum bolyongás optikai megvalósításában lényeges részfeladat fénynyalábok becsatolása kis keresztmetszetű (10 μ m nagyságrendű) hullámvezetőkbe. Ennek megoldására a lencsés fókuszálá mellett más technikák is szóba jöhetnek: kidolgoztuk az "önfokuszáló nyalábok" elméletét, melynek az a lényege, hogy olyan optikai nyaláb állítható elő, mely a Bessel-nyalábokhoz hasonlóan diffrakciómentesen terjed, mitöbb, a terjedés során a nyalábátmérő csökken, ez az "önfokuszálás". [13]

Hullámterjedés szabályozása erős kontrollimpulzus polarizációs állapotával

A kvantum bolyongás egyik legegyszerűbb megvalósítása passzív optikai elemekből felépített optikai hálózaton történik. Ebben a formában lényegében teljesen klasszikus a bolyongás (klasszikus hullámterjedéssel leírható), csak a fény (fotonok) detektálása miatt válik mégis kvantumossá a folyamat. Ha a bolyongás folyamatára is meg akarjuk követelni a kvantum jelleget, akkor fotonok esetében szórócentrumokat kell térben elhelyeznünk, a bolyongás pedig a

szórócentrumokonl történő rezonáns szóródásnak felel meg. Egy ilyen típusú bolyongás első lépéseként kidolgoztunk egy hullámterjedési folyamatot, melyben egy gyenge próbaimpulzus terjedését egy erős kontroll impulzus polarizációs állapotának szabályozásával tudjuk befolyásolni. [14]

Összefonódottság detektálása kollektív méréssel, részecskesokaságokban

A nemklasszikusság jellegzetes jelensége a kvantummechanikai összefonódottság. Az összefonódottság jellemzése és különösen annak praktikus detektálása nagyon fontos feladat a kvantuminformatikában és általában is összetett kvantumrendszerek esetében.

Számos kísérletet végeztek hideg gázokkal, amelyekben makroszkopikus kvantum összefonódottságot hoztak létre 10^6 - 10^{12} részecske között. Ezekben a rendszerekben egy-egy részecske állapotát nem tudjuk megmérni, csak kollektív mennyiségek mérhetőek. Egy 2007-es cikkünkben megtaláltuk az összes összefonódottság kritériumot $\frac{1}{2}$ -es spinű részecskék estére. Ugyanakkor, a kísérletekben legtöbbször a részecskék spinje nagyobb, mint $1/2$. Ezért a 2011-es cikkünkben meghatároztuk az összefonódottsági kritériumok teljes rendszerét a $j > 1/2$ esetre. Ezek a kollektív impulzusmomentum koordináták J_x , J_y and J_z mérését igénylik. A kritériumok egy másik részéhez impulzusmomentum operátoroktól különböző operátorokat kell mérni. (Ezek a d^2-1 SU(d) generátorra alapulnak, ahol a spin és a dimenzió kapcsolatát $j=2d+1$ írja le.) Azt várjuk, hogy ezeket a kriteriumokat hamarosan kísérletekben is felhasználják. Például, jól alkalmazhatóak összefonódottság detekcióra antiferromágneses Heisenberg spin rendszerekben. [15]

Spin-összefonódás kritériuma spin-összenyomásra alapozva

Kiterjesztettük Sorensen és Molmer k-részecskére vonatkozó összefonódási kritériumát fluktuáló részecskeszámú rendszerekre is. Eredményünket alkalmazva kimutattuk, hogy hideg gázokban végzett spin-összenyomási kísérletekben a részecskék gyakorlatilag megkülönböztethetőnek tekinthetők. Eredményeink igazolják, hogy a Sorensen-Molmer korlátok alkalmazhatóak a nemrég végzett spinösszenyomási kísérletekben. [16]

Összefonódottság detektálása

Kidolgoztunk egy olyan módszert, amellyel egy részecske sokaság zajos Dicke-állapotainak metrológiai hasznosságát lehet igazolni néhány kollektív mérés segítségével anélkül, hogy az érzékenységet közvetlenül meg kellene mérnünk. Módszerünk meghatározza az állapot hasznosságát a szokásos, a teljes spinkomponens második momentumának mérésén alapuló protokoll esetén,

amellyel megbecsülhető a Dicke-állapotok forgatási szöge. Ezen felül módszerünk a kvantum metrológia számára hasznos összefonódott állapotok detektálására is alkalmas. Eredményeinket friss kísérleti eredményeken teszteltük. [17]

Konvex burkolójú (convex roof) konstrukciókon alapuló hatékony módszert dolgoztunk ki összefonódottsági mértékek kiszámítására vonatkozóan. Módszerünk olyan mértékek esetében is alkalmazható, amelyek tiszta állapotok esetén operátorok várható értékének alacsony fokú polinomjaiként írhatók fel. Megmutattuk, hogy kétrésű rendszerekben hogyan számítható ki az összefonódottság lineáris entrópiája, a kevert állapotok összefonódottsága (entanglement of assistance), illetve megadtuk az összefonódottság dimenziójának korlátját. Módszerünkkel kiszámítható a három qubites állapotok háromrésű összefonódottsága. Azt is kidolgoztuk, hogyan adható meg részleges információ esetén, illetve eszközfüggetlen módon az összefonódottság lineáris entrópiája és a kvantum Fisher információ. [18]

Nemklasszikusság jellemzése és nemklasszikus állapotok előállítása

Véges fázistér, Wigner-függvények és kétqubites állapotok tomográfiája

Megvizsgáltuk két qubites állapotok Wigner-függvényét és tomografikus valószínűségi eloszlását. Megadtuk a leképezés kernelét, ami a Wigner-függvényen keresztül explicit formában meghatározza az állapot tomogramot a vizsgált kétqubites állapotra. Meghatároztuk a leképezés inverzének kernelét is, és megmutattuk a kapott leképezés kapcsolatát a csillagszorzat (starproduct) kvantálási sémával. [19,20]

Kvantum tomográfia és Dicke-állapotok

A kvantumállapotok tomográfiájának hatékonyságát rontja, hogy a mérés erőforrásigénye a qubitek számával exponenciálisan növekszik. Bemutattunk egy permutáció invariáns tomográfiát, ami esetén a hagyományos tomográfiával szemben minden erőforrásigény polinomiálisan skálázódik a qubitek számának függvényében mind a mérés erőforrásigényét, mind pedig a kapott adatok feldolgozásához és tárolásához szükséges számítási kapacitást tekintve. A pumpálás erősségét vizsgálva bemutattuk a permutáció invariáns tomográfia és a tömörített érzékelés (compressed sensing) ötvözésének hatékonyságát egy hat qubites szimmetrikus Dicke-állapoton, mely esetén a teljes tomográfia csak nagyon erős pumpálás mellett lehetséges. [21]

Interferometrikus Hardy-féle paradoxon

A Hardy-féle paradoxon a lokalitás tesztelésére ad elvi lehetőséget, kvantummechanikai korrelációk mérésével. Az eredeti gondolat kísérletet elemeztük szóráselméleti módszerek segítségével, követve a Geszti-féle előreszórt

hullám analízist, amelyet a úgynevezett kölcsönhatás-mentes mérés (interaction free measurement) elemzésére dolgozott ki. Megmutattuk, hogy a kétmódusú előreszórt hullámok, amelyeket a rendszer különböző elrendezéseire számoltunk ki, összefonódott struktúrát mutatnak. Az előreszórt hullámok kimutatott tulajdonságai értelmezik a nemlokális viselkedést a rendszerben és magyarázzák a paradoxont. [22]

Interferometrikus séma koherensállapot-szuperpozíciók létrehozására

Javaslatot dolgoztunk ki haladó hullámú optikai koherens állapotok szuperpozíciójának (Schrödinger-macska állapotok) előállítására. Ismert volt, hogy a Kerr effektus segítségével gyengén szeparált koherensállapot-szuperpozíciókat lehetne létrehozni. A javasolt elrendezésben két, ilyen módon előállított állapot keverése és homodin detektálása során feltételesen állítható elő nagyobb szeparációjú koherensállapot-szuperpozíció. Az elrendezés előnye, hogy nagy valószínűséggel egy kívánt típusú állapot áll elő. A preparált állapot egy meghatározott halmazból véletlenszerűen választódik ki a mérés során. [23]

Intelligens állapotok egy számoperátor-eltüntető operátor határozatlansági relációhoz

Nemrégiben felfedeztek egy új határozatlansági relációt, amely a harmonikus oszcillátor szám-fázis határozatlansági relációjának alternatívája lehet. A kvantumkémiaiából ismeretes diszkrét változójú reprezentáció módszerének segítségével numerikusan meghatároztuk, hogy mely állapotok minimalizálják ezt az új határozatlansági relációt. Megvizsgáltuk ezen állapotok fizikai tulajdonságait és összehasonlítottuk őket a Pegg-Barnett határozatlansági reláció intelligens állapotaival. Azt találtuk, hogy a fizikai paraméterek (nevezetesen a részecskeszám valamint a két kvadratúra) várható értékeinek egy adott halmazára az intelligens állapotok ezen két típusa ekvivalens. Az intelligens állapotok egy olyan hermitikus operátor legkisebb sajátértékéhez tartozó sajátállapotok, amelyet ha megfeleltetünk egy fizikai rendszer Hamilton-operátorának, akkor egy nemlineáris meghajtott harmonikus oszcillátort ír le, mint amilyen a Duffing-oszcillátor egy bizonyos paramétertartomány esetén. Ily módon lényegében az ilyen típusú fizikai rendszerek alapállapotát is meghatároztuk explicit analitikus formában. Mivel az általunk használt Pegg-Barnett intelligens állapotok koherens állapotok szuperpozíciójaként vannak kifejezve, azt is megvizsgáltuk, hogyan viszonyulnak ezek az állapotok a kísérletileg előállítható állapotokhoz. [24]

Qubitek tenzorszorzat-reprezentációjának előállítása

Kidolgoztunk egy olyan módszert, amely fizikai folyamatok révén képes qubitek tenzorszorzat-reprezentációjának előállítására. Egy qubit tenzorszorzat-reprezentációja három teljesen dekoherált qubit segítségével adható meg és az

eredeti rendszerre vonatkozó teljes információt tartalmazza. Ezen reprezentáció előnye abban áll, hogy a reprezentáló rendszer könnyedén stabilizálható a további külső hatásokkal szemben. Azt a problémát is megvizsgáltuk, hogy hogyan transzformálható vissza a reprezentációban lévő információ a kezdeti qubit állapotába. [25,26]

Periodikus egyfoton források optimalizációja

Bemutattunk egy elméleti elrendezést, amely alkalmazható az összes már létező vagy a közeljövőben megvalósításra kerülő térbeli és időben multiplexelt periodikus egyfoton forrásra. Modellünkben az összes releváns veszteségi mechanizmust figyelembe vettük. Az ismert sémák ezen statisztikai analízise azt mutatja, hogy a multiplexelő rendszerek különböző veszteségek figyelembe vétele mellett a térbeli multiplexerek vagy a multiplexelt időintervallumok és a bemenő fotonpárok számának megfelelő megválasztásával optimalizálhatóak annak érdekében hogy maximális egyfotonos valószínűséget kapjunk, valamint ezen felül feltárja az optimum létezésének fizikai okait is. Ismertettünk egy standard optikai elemekkel realizálható időben multiplexelt elrendezést, amely kísérletileg megvalósítva a bemutatott analízis alapján nagyon jó teljesítményt ígér: 85%-os egyfotonos valószínűség is elérhető vele olyan kísérleti paraméterek választásával melyeket a szakirodalomban már bemutattak. [27]

Nanovezeték és csapdázott hideg atomok közötti csatolás

Az utóbbi néhány évben lehetővé vált olyan eszközök készítése, melyekben egy dielektromos szubsztráton kialakított elektromos vezetők mikrométerű mágneses csapdát képeznek, melybe ultrahideg atomok Bose-Einstein kondenzátuma (angol rövidítéssel BEC) helyezhető el. Ezeket az eszközöket a szakirodalomban atomchipeknek nevezik. A különleges elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkező szén-nanocsövek (angol rövidítéssel CNT) iránti érdeklődésnek köszönhetően olyan javaslatok is születtek, ahol az atomchip mágneses csapdáját részben szén-nanocsövek segítségével valósítanák meg. A csapdázott ultrahideg atomok és az atomchipekre integrált szén-nanocső mágneses terének kölcsönhatása újfajta interfészt képvisel, amely belátást biztosíthat a kvantumozott transzportjelenségekbe. Mivel egy Bose-Einstein kondenzátum nagy pontossággal manipulálható, illetve detektálható, ideális lehet arra, hogy egy másik, csatolt kvantumrendszert vizsgáljunk vele.

Szén-nanocsőben folyó áram zajának mérése ultrahideg atomokkal

Klasszikus értelemben a galvanométer egy olyan eszköz, amely az elektromos áramot annak mágneses hatása révén méri. Számos mezoszkopikus eszközben azonban az áram kvantummechanikai mennyiségként kezelendő, melynek nagyságát és fluktuációit sem gyakorlati, sem elméleti szempontból nem triviális,

hogyan kell megmérni. Ugyanakkor az áramnak a kvantumozott transzport szintjén történő megfigyelése nemcsak az eszközök megfelelő jellemzését tenné lehetővé, hanem a kvantumozott- valamint a kvantumzaj-elmélet állításainak ellenőrzésére is új lehetőségeket biztosítana.

A kvantumozott áram mérésére szolgáló galvanométer, az ún. kvantumgalvanométer megvalósítása Levitov és munkatársai javaslata szerint elvben elképzelhető lenne egy olyan felező spinű részecske segítségével, amelynek spinje a mezoszkopikus vezető mágneses térben precessál. Ezen elméleti konstrukció révén ugyan matematikai szinten a töltéstranszport teljes mérési statisztikájának („full counting statistics”) generátorfüggvénye meghatározható, mégis, egy ilyen típusú kvantumgalvanométer realizálható fizikai megvalósítására ezidáig nem született javaslat.

Munkánkban egy ultrahideg, paramágneses atomokból álló Bose-Einstein kondenzátum és egy mechanikai rezgést végző szén-nanocsőben folyó áram mágneses tere közötti csatolást vizsgáltuk egy teljesen kvantumozott elmélet segítségével. Azt találtuk, hogy az említett kölcsönhatás elég erős ahhoz, hogy a nanodrót áramzaj-spektrumának kvantumozott tulajdonságait érzékelhessük az atomok hiperfinomállapot-függő megszámlálása révén. Az elektromos áramnak a mágneses tere révén történő ilyen típusú nemdestruktív megmérése megfelel a klasszikus galvanométer séma kvantumozott töltéstranszportra való kiterjesztésének. A nanodrót-BEC hibrid rendszerbeli kölcsönhatás általunk kiszámított nagyfokú érzékenysége megnyitja a lehetőséget a kvantumozott kontroll megvalósítása, illetve további releváns szabadsági fokokra történő kiterjesztése felé. [28]

A BEC hatása a csatolt nanovezetékre

Megmutattuk, hogy a nanovezeték rezgési módusai koherens módon manipulálhatók a Bose-Einstein kondenzátum segítségével. Az ultrahideg paramágneses atomok spinjének átfordulása ugyanis visszahat a vezeték rezgéseire, amely a mechanikai rezgési módus erősödését eredményezheti. Azt is megvizsgáltuk, hogy a kondenzátum véges energia-sáv szélessége milyen hatással van a parametrikus erősítésre. A rezolvens módszert felhasználva meghatároztuk a csatolás küszöbértékét, valamint megmutattuk, hogy a magnetomechanikai felöltöttség jelenségének következtében a rezgés frekvenciája szignifikánsan eltolódik. [29]

Referenciák

[1] Kiss T, Vymětal S, Tóth L D, Gábris A, Jex I, Alber G: Measurement-Induced Chaos with Entangled States, PHYSICAL REVIEW LETTERS 107:(10) Paper

100501. p. 4 (2011), 2011

[2] András Gilyén, Tamás Kiss, Igor Jex: Exponential Sensitivity and its Cost in Quantum Physics, *Scientific Reports* 6, 20076, 2016

[3] Lavicka H, Potocek V, Kiss T, Lutz E, Jex I: Quantum walk with jumps., *EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D* 64:(1) pp. 119-129. (2011), 2011

[4] Stefanak M, Barnett SM, Kollar B, Kiss T, Jex I: Directional correlations in quantum walks with two particles., *NEW JOURNAL OF PHYSICS* 13: Paper 033029, 2011

[5] B. Kollar, T. Kiss, J. Novotny, I. Jex.: Asymptotic Dynamics of Coined Quantum Walks on Percolation Graphs, *Phys. Rev. Lett.* 108, 230505, 2012

[6] Bálint Kollár, Jaroslav Novotny, Tamás Kiss, Igor Jex: Percolation induced effects in two-dimensional coined quantum walks: analytic asymptotic solutions, *New Journal of Physics* 16, 023002, 2014

[7] Kollár B, Kiss T, Jex I: Strongly trapped two-dimensional quantum walks, *PHYS REV A* 91: (2) , 2015

[8] B. Kollár, M. Koniorczyk: Entropy rate of message sources driven by quantum walks, *Phys. Rev. A* 89, 022338, 2014

[9] Zoltán Darázs, Tamás Kiss: Time evolution of continuous-time quantum walks on dynamical percolation graphs, *J. Phys. A: Math. Theor.* 46 375305, 2013

[10] Darázs Z, Anishchenko A, Kiss T, Blumen A, Mülken O: Transport properties of continuous-time quantum walks on Sierpinski fractals, *PHYS REV E STAT NONLIN* 90: (3) , 2014

[11] Schreiber A, Cassemiro K. N. , Potoček V, Gábris A, Jex I and Silberhorn Ch: Decoherence and disorder in quantum walks: From ballistic spread to localization, *Phys. Rev. Lett.* 106, 180403 (2011)

[12] A. Schreiber, A. Gábris, P. P. Rohde, K. Laiho, M. Štefaňák, V. Potoček, C. Hamilton, I. Jex, and Ch. Silberhorn: A 2D Quantum Walk Simulation of Two-Particle Dynamics, *Science* 336, 55, 2012

[13] G. Nyitray and Z. Kis: Self-confining waves, *J. Mod. Optics* v59, 1558-1568, 2012

[14] Zsolt Kis, Gabor Demeter, and Jozsef Janszky: Pulse propagation in a dressed, degenerate system, *J. Opt. Soc. Am. B / Vol. 30, No. 4*, 829, 2013

[15] Vitagliano G, Hyllus P, Egusquiza I L, Tóth G: Spin Squeezing Inequalities for Arbitrary Spin, *Phys. Rev. Lett.* 107, 240502 (2011), 2011

- [16] Hyllus P, Pezzé L, Smerzi A, Tóth G: Entanglement and extreme spin squeezing for a fluctuating number of indistinguishable particles, *Phys Rev A*; 86, 012337/1-11, 2012
- [17] Tóth G: Multipartite entanglement and high precision metrology, *Phys. Rev. A*, 85, 022322, 2012
- [18] Tóth G, Petz D: Extremal properties of the variance and the quantum Fisher information, *PHYSICAL REVIEW A* 87:(3) Paper 032324. 11 p., 2013
- [19] Adam P, Andreev VA, Ghiu I, Isar A, Man'ko MA, Man'ko VI: Wigner Functions and Spin Tomograms for Qubit States, *JOURNAL OF RUSSIAN LASER RESEARCH* 35:(1) pp. 3-13., 2014;
- [20] Adam P, Andreev VA, Ghiu I, Isar A, Man'ko MA, Man'ko VI: Finite Phase Space, Wigner Functions, and Tomography for Two-Qubit States, *JOURNAL OF RUSSIAN LASER RESEARCH* 35:(5) pp. 427-436.
- [21] B. Lücke, J. Peise, G. Vitagliano, J. Arlt, L. Santos, G. Tóth, and C. Klempt: Detecting multiparticle entanglement of Dicke states, *Phys. Rev. Lett.* 112, 155304, 2014
- [22] Koniorczyk M, Szabó L, Adam P: Hardy's paradox and the entanglement like structure of forward-scattered waves, *Phys. Rev. A* 84, 044102 (2011)
- [23] Adam P, Darázs Z, Kiss T, Mechler M: Double self-Kerr scheme for optical Schrodinger-cat state preparation., *PHYSICA SCRIPTA* T143: Paper 014002. (2011)
- [24] Adam P, Mechler M, Szalay V, Koniorczyk M: Intelligent states for a number-operator-annihilation-operator uncertainty relation, *PHYSICAL REVIEW A* 89:(6) 062108, 2014
- [25] Adam P, Andreev VA, Janszky J, Man'ko MA, Man'ko VI: Tensor-product representation of qubits and tensor realization of one-qubit operators, *PHYSICA SCRIPTA* T153, Paper 014001. 3 p., 2013
- [26] Adam P, Andreev VA, Janszky J, Man'ko MA, Man'ko VI: Preparation of tensor-product representation of qubits, *PHYSICA SCRIPTA* T160: 014001, 2014
- [27] Adam P, Mechler M, Santa I, Koniorczyk M: Optimization of periodic single-photon sources, *PHYSICAL REVIEW A* 90:(5) 053834, 2014
- [28] Kálmán O, Kiss T, Fortágh J, Domokos P: Quantum Galvanometer by Interfacing a Vibrating Nanowire and Cold Atoms., *NANO LETTERS* 12, 435-439, 2012
- [29] Z. Darázs, Z. Kurucz, O. Kálmán, T. Kiss, J. Fortágh, and P. Domokos: Parametric Amplification of the Mechanical Vibrations of a Suspended Nanowire

by Magnetic Coupling to a Bose-Einstein Condensate, *Phys. Rev. Lett.* 112, 133603, 2014

[30] P. Sinkovicz, Z. Kurucz, T. Kiss, and J. K. Asbóth: Quantized recurrence time in unital iterated open quantum dynamics, *Phys. Rev. A* 91, 042108, 2015