

Összefonódás a kvantumbit klónozásban és a Hardy-paradoxonban

Szabó Levente

doktori disszertációjának összefoglalása

témavezető:

Koniorczyk Mátyás



Pécsi Tudományegyetem

Fizika Doktori Iskola

Kvantumoptika Doktori Program

2017.

I. Az értekezés tárgya és a kutatás céljai

A kvantummechanika a teljes modern fizika alapvető elmélete, s mint ilyen, jelentős szerepet játszik a természet megértésében. A benne alkalmazott, szofisztikált matematikai modellek interpretációja a mai napig felvet megoldatlan fizikai és filozófiai kérdéseket, melyek közül nem egy, a hétköznapi szemléletmód számára szokatlan, attól merőben idegen természetű jelenségekhez vezet. Ennek ellenére, a kvantummechanika egy rendkívül sikeres elmélet. S míg alapító atyái egy sokrészű rendszerek leírására alkalmas teóriaként tekintettek rá, melynek érvényessége az egyedi fizikai rendszerek szintjén nem igazolható, a kísérleti technológia – különösen a kvantumoptika – területén, az elmúlt évtizedekben lezajlott félelmetes mértékű fejlődés lehetővé tette az említett, meghökkentő jelen-

ségek közvetlen megfigyelését. S valóban: a kvantummechanika érvényesnek bizonyul az egyedi fizikai rendszerek estében is. Mi több, a kvantumjelenségek elérhetővé válása által megnyíló új lehetőségek utat látszanak találni maguknak a gyakorlati alkalmazások felé is. A kvantummechanika hatására, a fizikában bekövetkezett paradigmaváltás megismétlődött az információelmélet és az információfeldolgozás területén is: mára a kvantuminformáció jól megalapozott elismertségnek örvend az eljövendő, feltörekvő technológiák között. Mindazonáltal, dacára annak, hogy napjainkban már kereskedelmi forgalomban kaphatók olyan termékek, mint például a kvantum véletlen generátorok és egyéb, kvantumtitkosítást megvalósító eszközök, még mindig sok a tisztázandó, jobban megértendő részlet.

Disszertációmban két témával kapcsolatos eredményeimet mutattam be. Ezek egyikében az univerzális kovariáns kvantumklónozó, vagy kvantumprocesszor alkalmazását vizsgáltam összefonódott állapotok manipulálására. A másik téma a Hardy-paradoxon egyfajta szóráselméleti elemzése. A bemutatott munka a kvantum-információelmélet területéhez kötődik. Az említett témakörökben végzett kutatás során végig alapvető jelentőséggel bírt a kvantumösszefonódás jelensége.

Az összefonódás bizonyos számszerű jellemzőinek alkalmazásával megvizsgáltam az összefonódás optimális univerzális aszimmetrikus kovariáns kvantum klónozóval (vagy kvantumprocesszorral) történő manipulálhatóságát kvantumbitek esetében. Kétrészű állapotok esetén az volt a kérdés, hogy a klónozás hűségének függvényében meny-

nyi összefonódás „marad” a pár másik tagja és klónozott tagja közt, és mennyi „megy át” a klónra. Azt találtam, hogy a kétrészes összefonódás, konkurenciában mérve, nemtriviális viselkedést mutat. Megvizsgáltam a GHZ állapot esetét is, amely inherensen háromrészes összefonódást mutat. Itt a feladat azon kétrészes összefonódások karakterizálása volt, amelyek a különböző részrendszereken végzett mérésekkel állíthatók elő. Azt találtam, hogy az összeállítás alkalmas a háromrészes összefonódás részleges kétrészesé alakítására. Ezek az eljárások hasznosak lehetnek különféle kvantuminformációs és kvantum számítási protokollokban.

A Hardy-paradoxon szóráselmélet nézőpontjából való vizsgálatát az a tény motiválta, hogy ez a hozzáállás egyszer már gyümölcsözőnek bizonyult a Hardy-paradoxon

kísérleti elrendezéséhez nagyon hasonló kölcsönhatásmentes mérés elméleti hátterének megvilágításakor. Az elemzés során a Hardy-féle gondolat kísérlet berendezésében opcionálisan kivehető illetve betehető nyálábosztók előreszórt hullámait kiszámítva megmutattam, hogy az említett kétrészi állapotvektorok összefonódott szerkezetűek, ami a jelenség erősen kvantumos természetére utal.

Tekintve, hogy létezik egy, a Hardy-féle gondolat kísérletben szereplő elrendezéshez nagyon hasonló foton interferometriai berendezés, ahol az eredeti Hardy-változatban említett részecske-antirészecske annihiláció szerepét, a nyálábosztón találkozó fotonok interferenciája veszi át, érdekes volt megvizsgálni e kísérlet Hardy-paradoxonhoz való viszonyulását, mégpedig az adott kísérleti elrendezés megfelelő nyálábosztóihoz tartozó előreszórt hullámok e-

lemzésén keresztül. Ezek szerkezetében az eredeti paradoxon esetéhez hasonló tulajdonságokat találtam.

II. Új tudományos eredmények

Új tudományos eredményeimet az alábbi pontokban foglalom össze. Az eredményeket taglaló tudományos közlemények felsorolását a tézisfüzet utolsó pontja tartalmazza.

1. Megmutattam, hogy ha egy kezdetben maximálisan összefonódott kvantumbit pár egyik tagját klónozzuk, a kvantumbitek összefonódása sajátos viselkedést mutat. Ennek fő jellemzője az, hogy a klónozás művelete után az eredeti kvantumbit pár két tagja – a nem klónozott és a klónozott – közötti összefonódás éppen úgy viselkedik, mint ahogy az az egyes segéd kvantumbiteket jellemző összefonódás esetében megfigyelhető. Ugyanez

tapasztható a nem klónozott kvantumbit és a klón közötti összefonódás tekintetében, melynek viselkedése a klónozott kvantumbit és a másik segéd kvantumbit közötti összefonódásával mutat teljes egyezést. Az összefonódás viselkedésének részletes leírását tartalmazza a disszertáció.

Ugyanezen elemzés kapcsán megmutattam azt is, hogy egy GHZ állapot egyik tagjának klónozásakor, az kvantumklónozó eszköz lehetővé teszi a kétrésű összefonódott erőforrások eredetileg teljesen háromrésű összefonódott erőforrásból való részleges kivonását. Az összefonódás viselkedéséről részletes elemzést adtam ebben az esetben, a Coffman-Kundu-Wootters egyenlőtlenségeket is felhasználva.

Összefoglalva: megmutattam, hogy az univerzális kvan-

tumklónozó (más néven: kvantum processzor) az összefonódás manipulálásának is hasznos eszköze, ezáltal ilyen módon is hasznos lehet a kvantuminformáció feldolgozás területén [I].

2. Az előreszórt hullámok szerkezetéből kiindulva megvizsgáltam a Hardy-paradoxonban szereplő interferometriai berendezést, szórócentrumként tekintve annak nyalábosztóira. Kimutattam, hogy az eredeti elrendezésben az előreszórt hullám nem szorzat-szerkezetű, továbbá azt is, hogy a két nyalábosztó előreszórt hulláma nem állítható elő az egyedi nyalábosztók előreszórásainak lineáris kombinációjaként. Az előreszórt hullám nulla nagyságú valószínűségi amplitúdót tartalmaz a rendszerben potenciálisan létrejövő foton esetére vonatkozólag, ami a Hardy-paradoxon és a kölcsönhatás-

mentes mérés közötti viszonyt illusztrálja. Ez a hozzáállás hasznosnak bizonyulhat a hasonló elrendezések elemzésekor [II].

3. Megvizsgáltam egy, az előző pontban tárgyalthoz hasonló, ténylegesen kivitelezhető kísérleti berendezést, ahol a Hardy-paradoxonban vázolt elrendezésben szereplő részecske-antirészecske annihiláció helyét két foton, nyálábosztón történő interferenciája vette át, ezúton csatolván a két, interferométert. Kiszámítottam a kimenet nyálábosztóinak előreszórt hullámait, s az előző pontban említett módszert alkalmazva megvizsgáltam azok összefonódás-szerű szerkezetét. Noha az összefonódást jellemző mennyiségek nem egyeztek az eredeti gondolat-kísérlet esetén kapott értékekkel, a két elrendezés viselkedése mutatott hasonlóságokat [III].

III. List of related publications

- I. L. Szabó, M. Koniorczyk, P. Adam, and J. Janszky:
Optimal universal asymmetric covariant quantum cloning circuits for qubit entanglement manipulation
Phys. Rev. A **81**, 032323 (2010).
- II. M. Koniorczyk, L. Szabó and P. Adam: *Hardy's paradox and the entanglementlike structure of forward-scattered waves*, Phys. Rev. A **84**, 044102 (2011).
- III. P. Adam, L. Szabó, M. Mechler, M. Koniorczyk:
Forward-scattered wave analysis of an optical Hardy-like setup, Phys. Scr. **T147**, 014001/1-4 (2012).