

1. félévi beszámoló

Portik Attila (portikattila@student.elte.hu)

Statisztikus Fizika, Biológiai Fizika és Kvantumrendszerek Fizikája PhD program

Témavezető: Kálmán Orsolya

A dolgozat címe: Kvantuminformatikai protokollok tervezése és dinamikájának vizsgálata

Bevezetés

A zárt kvantumrendszerek időfejlődése determinisztikus, így a lehetséges kvantumállapotokat jellemző sűrűségoperátor lineáris leképezéseivel leírható. Azonban a rendszer egy részének megfigyelésével, mérésével ez megváltoztatható. Ez által tervezhetünk olyan kvantuminformatikai protokollokat, melyek segéd qubiteken végrehajtott mérés és posztszelekció révén egy qubit vagy akár egy qubit pár nemlineáris időfejlődését idézik elő. Ezen az elven működő protokollokat javasoltak már például qubitek kvantumállapotának megkülönböztetésére, qubit párok összefonódottságának desztillálására, illetve kvantumszámítógépek teljesítményének ellenőrzésére is.

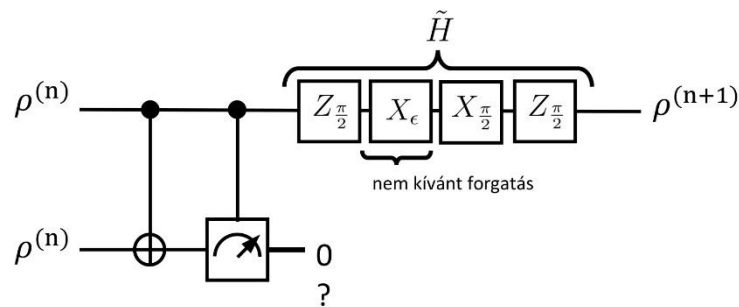
A kutatásomban az iterált nemlineáris kvantumprotokollokban rejlő lehetőségeket szeretném feltérképezni, a korábban már vizsgált két-qubites protokollok általánosítása által. Korábbi munkáimban már foglalkoztam a három-qubites, illetve n -qubites esettel, ugyanakkor ezen protokollsalád teljes megismeréséhez még további vizsgálatokra van szükség, melyeket a doktori munkám során tervezek elvégezni. A kutatás kiterjesztése összefonódott qubit párokon végrehajtott protokollokra, az általánosítás egy másik irányát képezi, amely által az alkalmazási lehetőségek skálája is kiszélesedik. Ugyanakkor fontos, hogy megvizsgáljuk a zaj protokollokra gyakorolt hatását is, hiszen jelenleg bármely kvantumprotokoll csak abban az esetben hasznosítható, ha az effektív módon végrehajtható napjaink zajos kvantumszámítógépein.

Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

A doktori képzésem 1. félévében az egy-qubites kvantumlogikai kapuk koherens hibáinak iterált nemlineáris protokollokra gyakorolt hatását vizsgáltam. A zaj a protokoll tetszőleges lépése, vagyis a qubitek kezdeti állapotának preparálása, azok időfejlesztése és manipulálása vagy mérése során is megjelenhet. A fellépő zaj lehet véletlenszerű vagy valamilyen koherens, minden alkalommal azonos módon fellépő, hiba következménye is. A kutatásom első szakaszában az ilyen szisztematikus hibákat vizsgálom meg. A koherens kapuhibák hatását egy hibás Hadamard kaput tartalmazó két-qubites protokoll tulajdonságainak megváltozását figyelve kezdtem el vizsgálni. Az alkalmazott nemlineáris protokollt és jellemző tulajdonságait már korábban vizsgálták [1,2]. A protokoll egyik legfontosabb jellemzője, hogy képes ellenállni a qubitek kezdeti állapotának preparálása során fellépő hibáknak. Ez a jelenség egy fázisátalakulás formájában azonosítható, amely során a geometriai struktúra, ami meghatározza a protokoll eredményét a kezdeti állapot függvényében, egy adott zajmennyiség fölött elveszíti a fraktál jellegét. A különböző lehetséges végállapotok vonzástartományának határát képező fraktál numerikusan becsült dimenziója állandó marad a kezdőállapotok tisztaságának függvényében, egészen addig, amíg

az egy kritikus érték felett marad. Amint a tisztaság a kritikus érték alá esik, a fraktál azonnal eltűnik, dimenziója lecsökken 1-re.

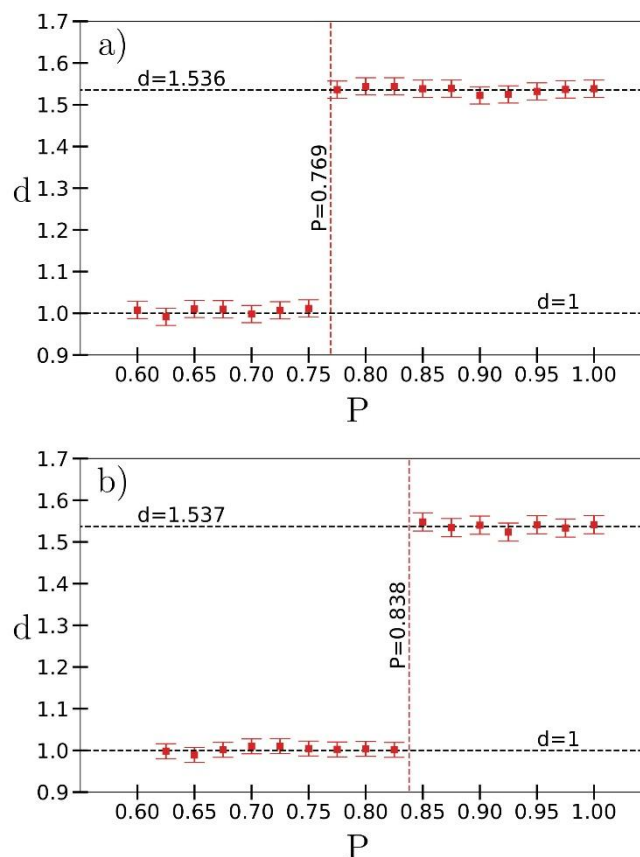
A koherens hiba modellezéséhez első lépésben a Hadamard kapu egymást követő forgatásokra történő felbontását tekintetem. A kapu egy kvantumállapotra gyakorolt hatása megadható, mint egy z -, x - majd ismét z -tengely körüli forgatása az állapotot leíró Bloch-vektornak. A különböző forgatásokat végrehajtó kvantumkapuk fizikai megvalósítását figyelembe véve kiderül, hogy a z -tengely körüli forgatás megvalósítható virtuális, ezáltal hibamentes módon. Ennek értelmében az általam vizsgált esetben a koherens hiba, mint egy x -tengely körüli nem kívánt, extra forgatás jelenik meg (lásd 1. ábra). A forgatás nagyságának jellemzésére bevezettem egy paramétert.



1. ábra: Egy hibás Hadamard-kaput tartalmazó iterált protokoll egy lépését megvalósító kvantumáramkör. A Hadamard kapu három egymást követő forgatásként áll elő. A koherens hiba egy nem kívánt forgatásként jelentkezik.

Tehát a Hadamard-kapu szisztematikus hibáját egy hibásan kalibrált forgatás, vagy másképpen egy nem kívánt forgatás hatásaként írjuk le. A fellépő koherens kapuhiba hatásait először a preparációs zajtól mentes esetben vizsgáltam. Meghatároztam a tiszta kvantumállapotok időfejlődését leíró komplex leképezés alapvető tulajdonságainak, mint például a taszító és vonzó pontok, vagy a Julia-halmaz szerkezete, megváltozását a bevezetett koherens hiba-paraméter függvényében. Ezt követően tanulmányoztam az egyidejűleg fellépő preparációs zaj és koherens hiba együttes hatását. Külön figyelmet fordítottam a protokoll korábbról már ismert zajtűrő képességének a megváltozására.

Az új eredmények azt mutatják, hogy a protokoll kimenetét meghatározó fraktál struktúra nem csak a preparálási zajnak, de a koherens kapuhibák hatásának is ellenáll, amíg azok mértéke nem halad meg egy kritikus értéket. Ugyanakkor a koherens hiba nagysága hatással van a protokoll zajtűrő képességére, mivel, ahogyan a koherens hiba nagysága megváltozik, úgy megváltozik a fázisátalakulás kritikus tisztasága is (lásd 2. ábra). A kritikus tisztaságnak a nem kívánt forgatás nagyságától való függése azt eredményezi, hogy bizonyos koherens hibák jelenlétében lecsökken annak a preparációs zajnak a mennyisége, amelyet a protokoll még képes tolerálni. Ahhoz, hogy a protokoll tulajdonságai lényegesen megváltozzanak jelentős nagyságú koherens hiba megjelenésére van szükség. A határt, azaz a hiba nagyságát, ami fölött a protokollnak megfelelő dinamikai rendszer tulajdonságai már alapjaiban megváltoznak, numerikus számítások révén sikerült meghatároznom. Így továbbra is állíthatjuk, hogy amíg a különböző forrásból származó zaj mennyisége nem halad meg egy relatíve magas küszöbértéket a protokoll tulajdonságai nem változnak meg szignifikánsan.



2. ábra: A vonzástartományok határának numerikusan becsült fraktáldimenziója a kezdőállapotok tisztaságának függvényében. Az a) ábra a koherens hiba nélküli esetet, míg a b) ábra az 5%-os koherens hiba esetét mutatja. Mindkét esetben megfigyelhető a fázisátalakulás, amely során a fraktáldimenzió ugrásszerűen lecsökken, a koherens hiba hatására a kritikus tisztaság megnő azaz a protokoll kevesebb zajt képes tolerálni.

A félév során, a fent bemutatott témában végzett kutatás eredményeiből egy beküldés előtt álló cikk készült, melyet a Physical Review A szakfolyóiratba tervezünk beküldeni hamarosan.

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

Az első félévben az alábbi kurzusokon vettem részt:

- FIZ/3/066E Nyitott kvantumrendszerek elméletei
- FIZ/3/029E Bevezetés a kvantumoptikába
- FIZ/3/064E Klaszterezés hálózatokkal

Szakmai közéleti tevékenység

A félév során mentorként részt vettem QHungary által szervezett Kvantumprogramozás QBronze minikurzus előkészítésében és lebonyolításában.

Hivatkozások

- [1] Malachov, M., Jex, I., Kálmán, O., Kiss, T., 2019. Phase transition in iterated quantum protocols for noisy inputs. *Chaos Interdiscip. J. Nonlinear Sci.*
- [2] Portik, A., Kálmán, O., Jex, I., Kiss, T., 2022. Iterated nth order nonlinear quantum dynamics with mixed initial states. *Phys. Lett. A*