

4. 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 jelenlegi kvantumszámítógépek legnagyobb limitációját a fellépő zaj és a dekoherencia jelenti. A rendelkezésre álló eszközök még nem képesek ezek hatását kiküszöbölni, így gyakorlati előnyt jelentő kvantumszámítások megvalósítására egyelőre nem alkalmasak. Ezért kiemelten fontos, hogy feltérképezzük, milyen típusú zajok dominálnak egy adott kvantumszámítógépen, illetve, hogy megértsük hogyan hatnak a különböző típusú zajok egy vizsgált kvantumprotokollra. Doktori kutatásomban olyan, úgynevezett nemlineáris protokollok tervezését és gyakorlati alkalmazási lehetőségének vizsgálatát tűztem ki, amelyekben azonos állapotú qubiteken végrehajtott összefonó művelet után néhányat megmérünk, majd a nem megmért qubit(ek)et egy kijelölt mérési eredménynek megfelelően posztszelektáljuk. Az ilyen típusú protokollok iterálásával kialakuló időfejlődés nemtriviális dinamikára vezet, amely különösen érzékeny lehet a különböző típusú zajokra, mivel a nemlineáris időfejlődés exponenciális érzékenységet eredményezhet a kvantumállapotok kis változásaira, míg az ismétlődő struktúra felerősítheti a fellépő koherens hibákat. Így ezek a protokollok ígéretes diagnosztikai eszközök lehetnek a kvantumprocesszorok zajosságának vizsgálatára, vagy még általánosabban, azok teljesítményének mérésére, ellenőrzésére.

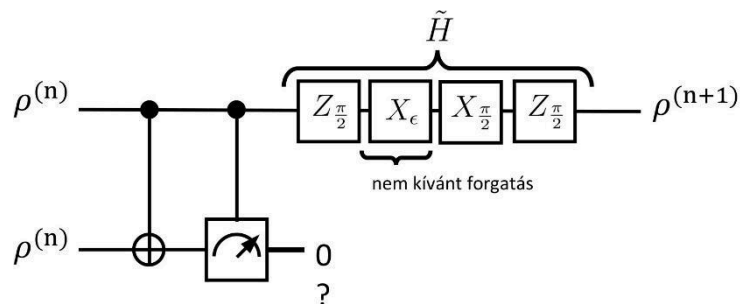
A doktori képzésem negyedik félévétől részt veszek a Kooperatív Doktori Programban (KDP), amelynek keretében végzett projektem a kvantumszámítógépek benchmarkolására koncentrált, így a doktori kutatásomban is kiemelt figyelmet fordítok a nemlineáris protokollok kvantumszámítógép-benchmarkként történő alkalmazására. Ezen kívül – a KDP keretein belül megvalósuló ipari együttműködésnek köszönhetően – a kutatásom témája kibővült még egyéb benchmark protokollok vizsgálatával és implementálásával is. Mindezek által lehetőségem nyílik az általam tervezett benchmark protokollok hitelesítésére és más benchmarkokkal való összevetésére, valamint a kvantumszámítógépek teljesítményének, képességeinek átfogó elemzésére.

Az előző három félévben elvégzett kutatások rövid ismertetése

A doktori képzésem keretei között végzett kutatásom során az egy-qubites kvantumlogikai kapuk koherens hibáinak iterált nemlineáris protokollokra gyakorolt hatását vizsgáltam. A koherens kapuhibák hatását egy hibás Hadamard kaput tartalmazó két-qubites protokoll tulajdonságainak megváltozását figyelve kezdtem el vizsgálni. Az alkalmazott nemlineáris protokoll 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 zaj mennyiség felett elveszíti a fraktál jellegét. A

különböző lehetséges végállapotok vonzástartományának határát képező fraktál numerikusan becsült dimenziója állandó marad a kezdő állapotok 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 kiderült, 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).



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.

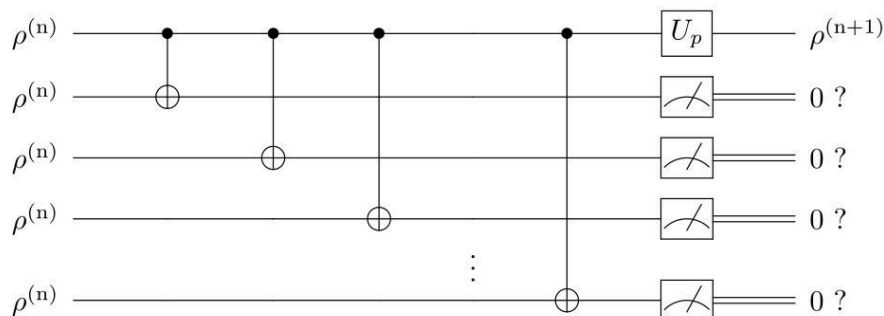
Az eredmények azt mutatják, hogy a protokoll kimenetét meghatározó fraktál struktúra nem csak a preparálási zajnak, de a koherens kapuhibák hatásának is ellenáll, amíg azok mértéke nem halad meg egy kritikus értéket. Ugyanakkor a koherens hiba nagysága hatással van a protokoll zajtűrő képességére, mivel, ahogyan a koherens hiba nagysága megváltozik, úgy megváltozik a fázisátalakulás kritikus tisztasága is. 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. Megvizsgáltam a protokoll olyan jellemző tulajdonságait, melyek megváltozása, vagy eltűnése a protokoll viselkedésének szemszögéből szignifikáns különbséget jelentenének, ugyanakkor érzékenyek a koherens hiba nagyságára. Numerikus számításokkal vizsgáltam ezen tulajdonságok megváltozását a koherens hiba nagyságának függvényében és kerestem azt a határt, ahol a koherens hiba már olyan mértéket ölt, hogy az adott tulajdonság alapjaiban változik meg. A vizsgált speciális protokollhoz rendelt dinamika legfontosabb ilyen tulajdonságai a két különböző tiszta vonzó állapot megléte, a maximálisan kevert állapot vonzó jellege és a belső taszító fixpont létezése. Mindhárom kiemelt tulajdonság szoros kapcsolatban van a korábban már felismert fázisátalakulás jellegű folyamattal. A belső fixpont tisztasága határozza meg ennek a folyamatnak a kritikus pontját. Meglepő módon azt tapasztaltam, hogy a dinamika másképpen reagál az azonos nagyságú de különböző előjelű forgatásként leírható, koherens hibákra. Attól függően, hogy alul- vagy túlforgatás történt az ideálshoz képest, a protokoll más és más tulajdonságai változnak meg először, így a protokoll koherens hibával szembeni tűrőképessége sem csak a hiba abszolút nagyságától függ. Azt találtam, hogy ez a speciális

protokoll jobban (kevésbé) tűri a Hadamard-kapu alulforgatásként (túlforgatásként) leírható koherens hibáját. A tűréshatárok meghatározása mellett vizsgáltam a hiba hatásaként kialakuló egyedi dinamika tulajdonságait is. A kutatás ezen szakaszában elért eredményekből készült cikk (Robustness of chaotic behavior in iterated quantum protocols Attila Portik, Orsolya Kálmán, Igor Jex, Tamás Kiss) a Physical Review A folyóiratban jelent meg [1].

A koherens kapuhibákon túl elkezdtem vizsgálni a véletlenszerű hibák által előidézett változásokat is a protokollhoz rendelhető dinamika tulajdonságaiban. A problémát numerikusan, a korábbi szimulációk kiegészítésével vizsgáltam. Az eredmények azt mutatják, hogy ellentétben a szisztematikus hibával, kismértékű de véletlenszerű hiba is elronthatja a kvantumállapotok konvergenciáját. Az egy-qubites kapuk hibáinak vizsgálata mellett a több-qubites logikai kapuk koherens hibájának vizsgálatát is megkezdtem. Mivel ismeretes, hogy a gyakorlatban a két-qubites kapuk hibája dominál, fontos, hogy az analízist kiterjesszük ezen kvantumkapukra is. Folyamatban lévő munkánk során analitikus számítások és megfontolások révén keresünk olyan hiba modellt, mely magyarázza a gyakorlatban tapasztalható koherens hibákat.

Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

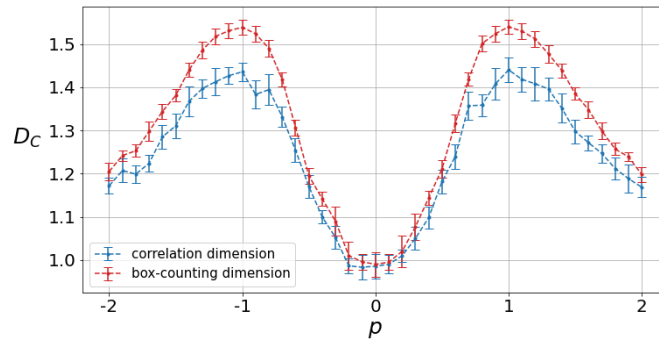
A doktori képzésem negyedik félévében tovább folytattam az iterált nemlineáris kvantumprotokollok tulajdonságait és alkalmazási lehetőségeit vizsgáló kutatásomat. A kutatást kiterjesztettem az általánosabb, n -ed rendű nemlinearitást tartalmazó protokollra. Ebben az esetben a protokoll minden lépésében összesen n qubitet használunk, melyek közül az első kivételével mindegyiket megmérjük (lásd 2. ábra).



2. ábra: Az n qubites nemlineáris protokoll egy lépését megvalósító kvantumáramkör.

A kvadratikus esettel szemben, itt nem csak a Hadamard kapuhoz képesti nem kívánt kis forgatások hatását vizsgáltam, hanem azt az általános esetet, amikor a megtartott qubitre egy p komplex számmal jellemezhető tetszőleges unitér operátort megvalósító logikai kapuval hatunk. A protokoll és a hozzá tartozó dinamikai rendszer tulajdonságait a korábban is alkalmazott numerikus eszközök továbbfejlesztett változatával vizsgáltam. Ennek segítségével meghatározhatók a dinamika főbb tulajdonságai: a megjelenő attraktorok és azok vonzástartományai, a vonzástartományok határa és a határ fraktál tulajdonságai valamint a dinamika fixpontjai. A dinamika és így a protokoll jobb megértését segítő, a kaotikus rendszer leírására eddig alkalmazott módszereket kiegészítettem továbbiakkal, mint például a

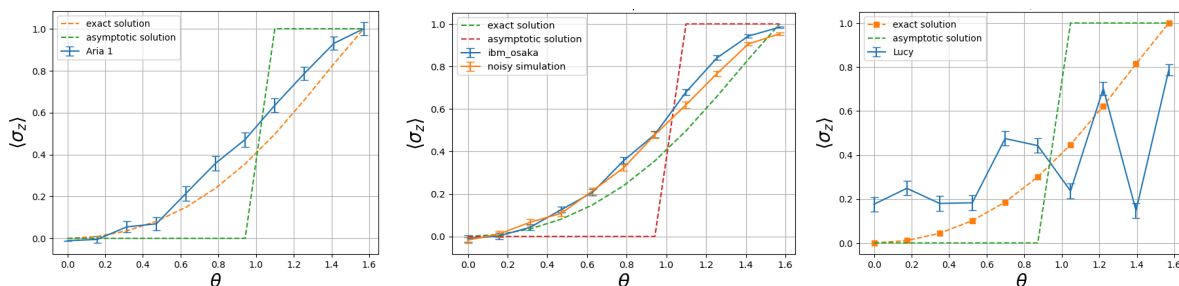
megjelenő fraktálra jellemző általánosított dimenzió meghatározása, a korrelációs dimenzió meghatározása, a multifraktál spektrum származtatása és a Bloch-gömb belsejébe ágyazott 3 dimenziós fraktál dimenziójának direkt számítása. Az új eredmények jó egyezést mutatnak a már korábban megismertekkel. Vizsgáltam a protokoll dinamikai tulajdonságainak változását p paraméter függvényében (például lásd 3. ábra).



3. ábra: A 3 qubites protokoll által definiált fraktál doboz-számlálási és korrelációs dimenziója a p paraméter függvényében.

A fenti numerikus vizsgálatok mellett, a nemlineáris protokoll több különböző egyszerű verzióját implementáltam az IBM és az Amazon AWS rendszerén keresztül elérhető szimulátorokon és kvantumszámítógépeken. A protokollokat megvalósító áramköröket elsősorban a Qiskit SDK és Amazon Braket SDK segítségével hoztam létre. Az elvégzett kísérletek elsődleges célja a nemlineáris protokollok megvalósíthatóságának vizsgálata, illetve a későbbi benchmark protokollként történő alkalmazási lehetőségének felmérése volt. Elsősorban az analitikusan is részletesebben vizsgált Hadamard-kaput tartalmazó protokoll 1, 2 és 3 lépéses iterált változatát implementáltam. A kapott eredmények biztatóak a protokoll megvalósíthatósága tekintetében, ugyanakkor már a vizsgálatok ezen kezdeti szakaszában is jól tükrözik az eltérő kvantumszámítógépek minőségbeli különbségeit (lásd 4. ábra).

A KDP projekt első szakasza során áttekintettem a kvantumszámítógépek benchmarkolására alkalmazott legnépszerűbb protokollokat és algoritmusokat, és azok legfontosabb tulajdonságait, illetve elérhető implementációikat. Ezekből összeállítottam egy gyűjteményt, törekedve az összehasonlíthatóságra, mely később egy benchmark csomag összeállításának lehet a kiindulópontja.



4. ábra: A két qubites protokoll első lépésének megvalósítása különböző kvantumszámítógépeken (Balról jobbra: IonQ Aria 1, IBM Quantum Computing ibm_osaka és Oxford Quantum Circuits Lucy). A kísérletek során mért adatokat az analitikus és az aszimptotikus megoldással hasonlítottam össze.

Publikációk a doktori képzés alatt:

[1] A. Portik, O. Kálmán, I. Jex, and T. Kiss, Phys. Rev. A, **109** 042410 (2024).

Tanulmányi tevékenység a doktori képzés alatt

I. félév:

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

II. félév:

- FIZ/3/042E Semleges atomok lézeres hűtése és csapdázása
- FIZ/3/060E Kvantuminformáció-elmélet
- FIZ/3/070E Kvantumelektrodinamika rezonátorban

III. félév:

- FIZ/1,3/050E Soktestprobléma II. FIZ/3/004E Fraktálnövekedés EA

IV. félév:

- FIZ/3/004E Fraktálnövekedés EA

Szakmai közéleti tevékenység a doktori képzés alatt

- Mentorként részt vettem a QHungary által szervezett Kvantumprogramozás QBronze minikurzus előkészítésében és lebonyolításában.
- ICTP - Quantinuum Quantum Hackathon ICTP, Trieszt, Olaszország (Best team project)
- GPU Day 2023, Budapest 2023 (Előadás: Iterated nth order nonlinear quantum dynamics)
- Kvantuminformatikai Nemzeti Laboratórium Workshop, Budapest 2023 (Poszter: Effect of Coherent Errors on Iterated Quantum Protocols)
- Central European Workshop on Quantum Optics (Poszter: Effect of Coherent Errors on Iterated Quantum Protocols) Milano, Olaszország, 2023

Az idei év folyamán tervezek részt venni a következő eseményeken:

- Recent Advances In Quantum Computing And Technology (ReAQCT 2024), Budapest 2024 Június 19-20 (Poszter: Robustness of chaotic behavior in iterated quantum protocols)
- Kvantuminformatikai Nemzeti Laboratórium Workshop, Budapest 2024
- Meeting on Complex Systems & Stochastic Processes, Guadalajara, Jalisco, México 2024 Július 1-5 (Poszter: Iterated nth order nonlinear quantum dynamics with mixed initial states)
- IEEE Quantum Week 2024, Montréal, Québec, Canada, 2024 Szeptember 15–20 (Poszter: Robustness of chaotic behavior in iterated quantum protocols)