

4. FÉLÉVES BESZÁMOLÓ

Rozgonyi Áron (aaron9605@student.elte.hu)

Anyagtudomány és Szilárdtestfizika PhD program

Témavezető: Dr. Széchenyi Gábor

A dolgozat címe: Kvantumos hibajavítás topologikus kvantumszámítógépekben

1. Bevezetés: Kvantumos hibajavítás kvantumszámítógépeken

Kutatási téma rövid összefoglalása

Elméleti munkám során a kvantumos ismétlő kódokkal (repetition code) [1,2] szeretnék foglalkozni, amelyekkel lineáris kvantumdot rendszerekben lehet kvantumos hibadetektálást és javítást végezni. Előzetes terveink szerint a kutatás során ezen kódok megvalósításának lehetőségét vizsgálunk szilárdtestfizikai kvantumdot rendszerekben. A KDP program keretében ezen eredményeket felhasználva valódi kvantumszámítógépekre adaptált hibajavító eszközöket, hasznos algoritmusokat és teszteket tervezet fejleszteni.

Kutatási témám részletesebb leírása és motivációja

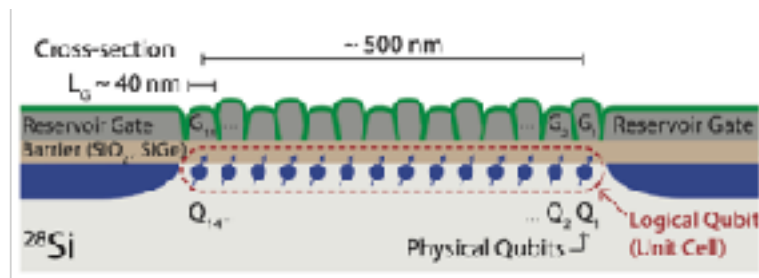
A kvantumszámítógép egy a kvantumos információ manipulálására alkalmas berendezés, melynek egyik legismertebb fajtájában az információt két állapotú kvantumrendszerben, ún. kvantumbitekben tároljuk, hasonlóan a klasszikus számítógépek bit alapú adattárolásához. Ellenben a kvantumbitek alapvetően különböznek klasszikus társaiktól, mert itt a két lehetséges állapot (0 és 1) tetszőleges szuperpozíciója megvalósítható. Ez a szabadság teljesen új látóhatárokat nyit meg a számítások terén, és olyan algoritmusok konstruálhatóak meg, melyek gyorsabban vagy kisebb erőforrással oldalnak meg problémákat a kvantumszámítógépeken, mint a klasszikusokon. Ez a fő motivációja, amiért a kutatók jelenleg is azon dolgoznak, hogy minél jobb és nagyobb kvantumszámítógépet építsenek. A legnagyobb kihívást az jelenti, hogy a kvantumos állapotot minél hosszabb ideig megőrizzük, azaz a kvantumbit környezettel való kölcsönhatása miatt ne vesszen el annak kvantumos tulajdonsága.

A tavalyi év során a Google bemutatott egy olyan 54 kvantumbites kvantumszámítógépet [3], mellyel elérték a kvantumfölényt, azaz találhatóak már olyan egyszerű számítások, amit a kvantumszámítógép több milliárdszor gyorsabban végez el, mint a jelenlegi legerősebb szuperszámítógép. Ellenben ezeknek az egyszerű számításoknak a kód mélysége igen kicsi, azaz a kvantumbitekkel egymás után csak néhány 10 műveletet tudnak elvégezni. Ennek oka, hogy a kvantumbitek igen „piszkosak,” azaz ennyi lépés után elveszti kvantumos tulajdonságát. Amennyiben hosszabb algoritmusokat szeretnénk futtatni, mindenképpen tovább kell lépni és kvantumos hibajavításra van szükség. Ilyenkor a működés közben fellépő hibákat szeretnénk az algoritmus futása során is érzékelni és kijavítani. Hibajavítás esetén már tetszőlegesen hosszú kódokat is lehet majd a kvantumszámítógépeken futtatni.

A kvantumos hibajavítás alapját az képezi, hogy nem egyetlen fizikai kvantumbitét használunk arra, hogy a logikai értéket kódoljuk, hanem több fizikai kvantumbit kódolja a logikai kvantumbit

értékét. Így, ha a zaj miatt egyetlen fizikai kvantumbit értéke megváltozik, akkor a többinek a segítségével korigálni tudjuk annak értékét.

Az ismétlő kód az egyik legegyszerűbben, akár 5 kvantumbiten megvalósítható kvantumos hibajavító kód, melynek egyszerűsége mellett, számos hátránya is akad. A kód felskálázásával nem lehet pontosítani a kvantumos hibajavítást, illetve nem képes megvédeni az információt az összes egykvantumbites hibától. Az egykvantumbites Pauli X-hibák (bit/spin átfordulás) korigálására az ún. bit-flip kódot, a Z-hibák (fázis hibák) korigálására a phase-flip kódot használjuk. Skálázható, univerzális hibajavító kódokat a bit-flip és phase-flip kódok egymásba ágyazásával juthatunk. Az ismétlő kódok egyik legnagyobb előnye a híresebb két-dimenziós ún. surface és toric kódokkal [7,8,9] szemben, hogy könnyen implementálható egydimenziós rendszerekben, ahol egy láncra fűzve egymást követik a kvantumbitek. Ismétlő kódokat már többféle platformon is sikerült kísérletileg megvalósítani, mint például szupravezető kvantumbitekből [4,12], illetve hibadetektálásra való alkalmazásukat is demonstrálták egy 4-qubites kódon csapdázott ion [5] és szupravezető kvantumbitekből [6].



Spin-qubitekből alkotott hardver architektúra sematikus vázlata. Silíciumban alkotott 14 db. kvantum-doton csapdázzák az elektronokat, majd azok spin szabadsági fokát használják a kvantumbit realizálására. Az így alkotott spin-qubit lánc elfogható egy db logikai qubiteként és az elrendezés használható repetition kódként. Az eszközön hibadetektáló javító algoritmusok készíthetők.

2. Célkritizálás:

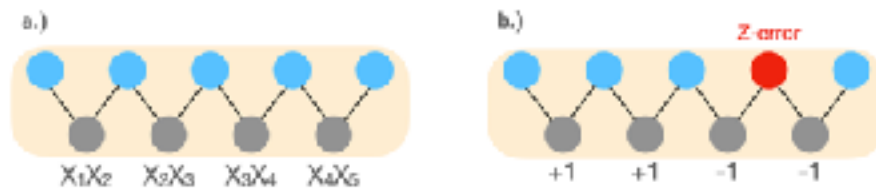
A kutatás célja, hogy elméleti úton vizsgáljuk kvantumos hibajavító kódok implementálásának lehetőségét spin-quantumbit alapú rendszerekben. Fő kérdésként azt vizsgáljuk, hogy milyen hibaforrások esetén kapunk az ismétlő kódok segítségével robusztusabb logikai kvantumbitet, mintha egyetlen kvantumbiten kódolnánk az információt. Bit-flip/ phase-flip ismétlő kódok megvalósításának lehetőségét vizsgálnánk releváns, realiztikus zaj-mechanismusok mellett: qubit relaxáció, depolarizáció, inhomogén fázisvesztés, koherens hibák, kiolvasási hiba. Célunk, hogy modelljeinkkel olyan kísérletileg releváns paraméterértékeket javasoljunk, melyek segítségével a közeljövőben épített kvantumszámítógépekben használt logikai kvantumbit élettartamát jelentősen megnövelve az meghaladja egyetlen fizikai qubitét, így zajtól védetté téve az abban tárolt kvantumos információt.

A KDP keretében a fenti célokat egészítjük ki elérhető kvantumszámítógépeken szerzett tapasztalatokkal. Célunk, hogy a jelenlegi és közeljövőben elérhető kapualapú kvantumszámítógépeken futtatható algoritmusokat fejlesszünk, amelyek egyrészt az egyelőre

rendkívül magas zajszint mellett is végre tudnak hajtani hasznos részfeladatokat, másrészt pedig tesztek és benchmarkokat alakítsunk ki, amelyek iránt a kvantuminformatika fejlődésének jelenlegi szakaszában óriási érdeklődés mutatkozik. Módszertanilag a vállalati partner (Wigner FK) mérésekkel befolyásolt iterált nemlineáris protokollokkal szerzett tapasztalatait kívánjuk felhasználni. Az egyetemen végzett elméleti kutatásaim eredményei jól beépíthetőek ebbe a konstrukcióba, mind a hibajavítási eljárások, mind a kialakított zajmodellekre vonatkozó analitikus eredmények tekintetében.

Az első három félévben végzett kutatási tevékenységeim:

Szimuláltam egy N-qubites phase-flip ismétlődő kódot analitikusan, illetve numerikusai is. Stabilizátor mérések segítségével képesek vagyunk realisztikus depolarizációs hibák (relaxáció, inkoherens fázisvesztés) detektálására valamint javítására is egy bizonyos mértékig.



A megvédeni óhajtott információt redundánsan kódoljuk be a fizikai adat qubitek egy összefonott speciális állapotába. További segéd (ancilla) qubiteket vezetünk be és kapcsolunk össze a szomszédos adat qubitekkel, ezeket a hibadetektálásra fogjuk használni. Ezt az együttes rendszert egy logikai qubitként értelmezzük.

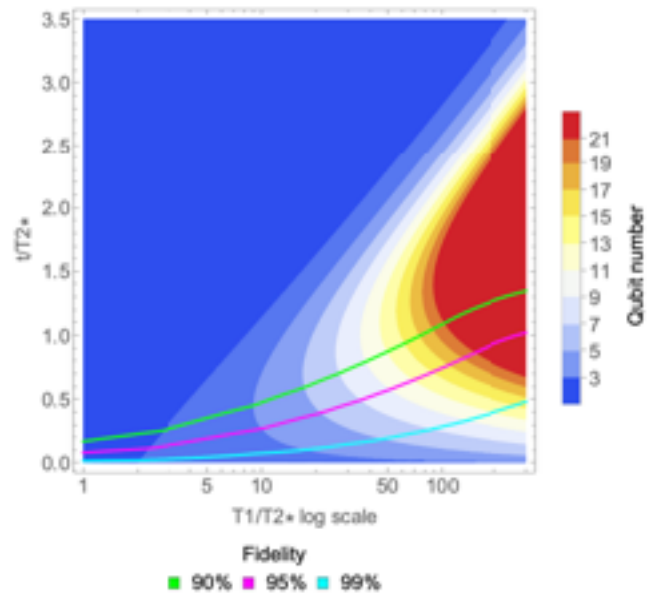
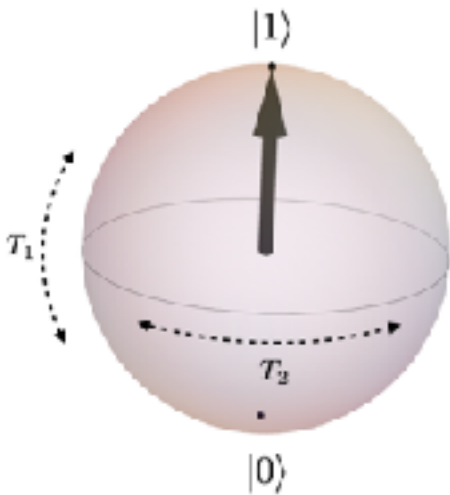
$$|\psi\rangle_L = \alpha |+\dots+\rangle + \beta |-\dots-\rangle$$

Az ancillákon olyan mérhető mennyiségeket mérünk amelyeket úgynevezett stabilizátorok, tehát a mérő operátorok sajátállapota a bekódolt logikai állapot $+1$ sajátértékkel, így a mérés utáni állapot változatlan marad. Ha egy hiba történik a rendszeren azt ezzel a stabilizátor méréssel úgy tudjuk detektálni, hogy az egyes mérőoperátorok sajátértéke -1 -re változik. Végig mérve az összes stabilizátort ($+1, -1$) sajátértékek sorozatát kapjuk, amit szindrómának nevezünk.

A szindróma alapján dekódolhatjuk a hibát és helyreállíthatjuk a logikai állapotot. Többféle dekóder használható pl.: Legkisebb-súlyú dekóder (Minimum-weight-matching), gráf-dekóder stb.

Elképzelhető, hogy a dekódolás olyan értelemben sikeres, hogy visszakerülünk a kódterünkbe, de nem a kiindulási állapotba, hanem a rá ortogonális másik logikai bázisállapotba, ezzel pedig egy úgynevezett logikai hibát vétettünk. Ennek a vizsgálatára a Bloch-gömbre kiátlagolt hűség (fidelity) mennyiséget vizsgáltam.

A szimulációk eredményeképpen egy iránymutatást tudunk adni kvantum-számítógép mérnököknek, hogy miként építsék meg (hány kvantumbites kódhosszúnak válasszák) a hibajavított kvantum processzort, amely a legjobban véd a legrealisztikusabb hibáktól, mint például a relaxáció és az inhomogén fázisvesztés. Ezen hibák jellemezhetőek a T_1 és T_2^* koherencia-idővel, melyeket bizonyos mértékig hangolhatóak (pl.: spin-echo, dynamical decoupling technikákkal). Valamint az eredményeink alapján egyértelműen megválaszthatóak azok a platformok, amelyeken a phase-flip hibajavító kód működőképes, így azt érdemes megépíteni.

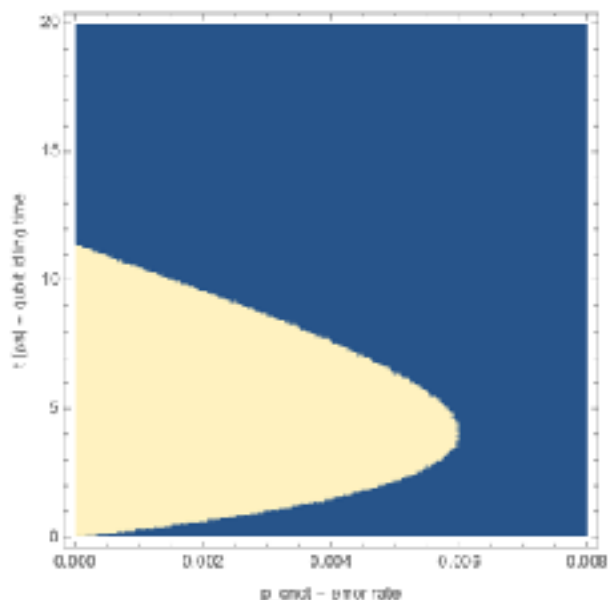


A szimulációkból, illetve az elméleti megfontolásokból egyértelműen látszik, hogy a szupravezető alapú quantum processzorokból (amelyekben a relaxáció a domináns zajmechanizmus) nem, azonban a félvezető (spin) alapú platformokon megéri ilyen típusú kódokat építeni hibajavítás szempontjából, mivel ezekben a fázisvesztés a domináns hiba.

Aktuális félévben végzett kutatási eredményeim:

További zajmodelleket vezettem be:

Korábbi eredményeinket tekintve tökéletes kapu műveleteket tételeztünk fel. Valójában ezek kapuk nem pontosan abba az állapotba visznek, mint amelyet a művelet megkövetelne. Ezt egy zajként tekintve leírhatjuk egy depolarizációs csatornával, amely a két-qubites kapu után történik. A stabilizátor mérések tartalmaznak ilyen két-qubites CNOT kapukat. Ezek hibáját a CNOT művelet után egy inkohérens szimmetrikus depolarizációs zajjal vesszük figyelembe. Az inkohérens azt jelenti, hogy a zaj minkét qubiten különbözőképpen hat. A hibacsatornát Kraus-operátorok helyett annak “Pauli-pödrött” (Pauli-twirled) alakjában írtuk fel, azaz a zajt Pauli X-,Y-,Z- hibákra bontottuk. A zajt szimmetrikusnak tekintve azt feltételeztük, hogy egy adott qubiten ugyanakkor valószínűséggel történik X,Y,Z hiba.

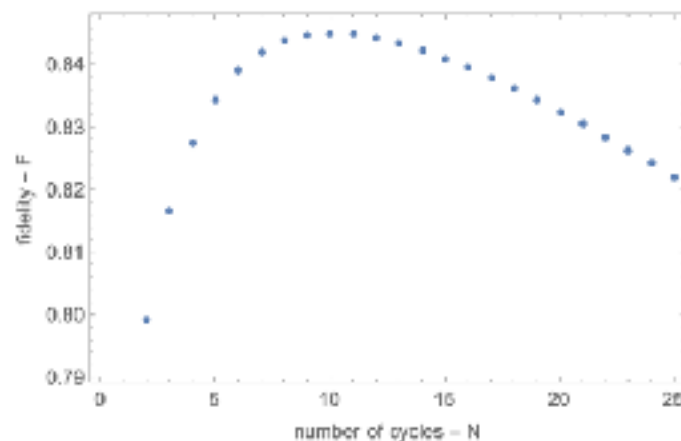


Valamint a méréseket, azaz az ancilla qubitek kiolvasását is tökéletesnek feltételeztük, de valójában ezek sem mindig azok. Elképzelhető, hogy egyes esetekben valamilyen p valószínűséggel rossz állapotot eredményez a kiolvasás. Tehát az eredetileg 1-es állapotban lévő ancillát mi 0 állapotban mértük. Innentől kezdve pedig mivel a dekódolás függ ezen ancillák állapotától rosszul fogunk javítani és további hibákat teszünk a rendszerbe.

Több hibajavító ciklust alkalmaztam:

A hibajavítás teljesítménye tovább fokozható, ha egynél több hibajavító stabilizátor mérő-ciklus alkalmazunk. Vegyünk egy fix t időtartamot, ameddig szeretnénk megóvni a tétlen qubitet a zajoktól. Az előbbieken ennek az időtartam csak a legvégén egy hibajavítást végeztünk. Most vezessünk be több hibajavítást egyenlő időközönként. Ezzel pedig elérhetjük, hogy a kisszögű elfordulásokat a qubiten stabilizáljuk azáltal, hogy folyamatosan rámérünk a qubitre és visszalökjük a bázisállapotba, illetve dekodectáljuk ha egy teljes átfordulás (phase-flip) történt és javíthassuk.

De azáltal, hogy megnöveltük a stabilizátor mérések számát, egyben megnöveltük a CNOT kapuk számát is. Ezek pedig a hibát is megnövelhetik, így ez korlátozza a hibajavítás teljesítményének fokozhatóságát. Definiálható egy optimális hibajavító ciklus szám, amellyel még jobb javítás érünk el mint egyetlen ciklus alkalmazásával de egyensúlyban van a CNOT hibák bevitelével.



Publikációk:

Beküldés előtt:

Phase-flip repetition code with realistic noise model

Áron Rozgonyi, Gábor Széchenyi

Physical Review B

Tanulmányi tevékenységeim az aktuális félévben:

Az alábbi kurzusokat végeztem el:

- Gépi tanulásos módszerek szeminárium
- Anyagfizika I.

Elismerések, díjak:

Kiss Tamással (Wigner FK) közösen Kooperatív Doktoranduszi Pályázatot (KDP) nyertünk.

Konferenciák, szemináriumok, nyári iskolák:

Részt vettem Quantum Information Processing (QIP) nemzetközi virtuálisan megszervezett konferencián.

Részt vettem a Quantum Eastern Europe (QEE) virtuálisan megszervezett nemzetközi konferencián a Lighting Talk Session-ben egy rövid előadással a kutatási eredményeim bemutatása céljából.

Elfogadták a jelentkezésemet a júniusban megrendezésre kerülő *Quantum Matter* nemzetközi konferenciára (Barcelona, Spanyolország), illetve *Quantum Measurement, Communication and Computing Conference* (Lisbon, Portugal), melyekre posztert készítettem a kutatási munkámat összefoglalóul.

További konferenciákra/iskolákra nyújtottam be jelentkezést előadással/poszterrel, amelyekről még nem kaptam visszajelzést:

- DPG Meeting (Regensburg, Germany)
- Post-Quantum Cryptography School (Budapest, Hungary)
- Quantum Techniques in Machine Learning Conference (Naples, Italy)
- Quantum Designer Workshop (Spain)
- SuperQuLan Quantum Computing Summer School (Santander, Spain)

Regisztráltam az IBM Quantum *Qiskit Quantum Simulations Summer School* két hetes intenzív programjára.

Részt veszek júniusban a QWorld *Quantum Science Day 2022*-es 3 napos nemzetközi tudományos meeting-jén.

Heti rendszerességgel veszek részt a kutatócsoportom Journal Club tematikájú online meetingjén, amin magam is tartok előadásokat a legfrissebb cikkek ismertetésének céljából.

Heti rendszerességgel veszek részt a kutatócsoportom Small Quantum Codes témájú online meetingjén, amin magam is rendszeresen tartottam előadást az általam feldolgozott aktuális cikkekről, illetve Progress Report előadásokat tartottam összefoglalva a kutatómunkám eredményeit gyakori rendszerességgel.

Heti rendszerességgel veszek részt az ELTE QNL (Quantum Nemzeti Labor) szemináriumán, amin rendszeresen tartottam előadásokat a kutatási témám ismertetése céljából, illetve a Qiskit kvantumszámítógép szimulátor használatának elsajátításához készítettem notebook-at oktatási céllal a meeting többi résztvevőjének is.

Heti rendszerességgel veszek részt Csabai István kutatócsoportjának heti Gép Tanulás (Machine Learning) tematikájú Journal Club meetingjein, amin én magam is tartottam előadást a gépi tanulási módszerekről a kvantum hibajavításban.

Gyakori rendszerességgel vettem részt a Tanszéki Szemináriumokon.

Oktatói tevékenységeim:

Ebben a félévben az Emelt Szintű Elektromágnesség és Optika kurzuson voltam demonstrátor és házi feladatokat, zárthelyi dolgozatokat javítottam és konzultációkat tartottam.

ELTE BEAC szerződéses sportösztöndíjasaként tartok 4. éve testnevelés kurzust (heti 3x 1.5 óra) és BEAC edzést (heti 2x 1.5 óra). Következő félévben is tartom ezeket az órákat.

Az előző félévek mindegyikében a Klasszikus Fizika Laboratóriumon voltam mérésvezető, covid alatt intenzíven mindegyik laboralkalmon ott voltam és online méréseket is tartottam egyedüli doktoranduszként. A kvantummechanika gyakorlati kurzus utolsó óráján ismeretterjesztő előadást tartottam a kvantummechanika alkalmazásáról kvantumbiteknél. Továbbá minden félévben tartottam a testnevelés kurzusokat, amelyeken egyes szemeszterekben 120 fős létszámban voltak hallgatók.

Hivatkozások:

[1] Jones, C., Gyure, M., Ladd, T. et al. *Logical Qubit in a Linear Array of Semiconductor Quantum Dots*, *Physical Review X* **8**, 021058 (2016).

[2] M. Rispler, P. Cerfontaine, V. Langrock, and B.M. Terhal, *Towards a realistic GaAs-spin qubit device for a classical error-corrected quantum memory*, *Physical Review A* **102**, 022416 (2020).

[3] F. Arute et al., *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*, *Nature* **574**, (2019)

[4] J. Kelly, R. Barends, A. G. Fowler: *!State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit,* *Nature* **519**, 66–69 (2015).

[5] N. M. Linke: *Fault-tolerant quantum error detection*, *Science Advances* **3** (2017), 10.1126/sciadv.1701074

[6] R. Harper and S. T. Flammia: *Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience*

[7] A. Yu. Kitaev. *Fault-tolerant quantum computation by anyons*. *Annals Phys.* **303** (2003)

[8] Andersen et al., *Repeated Quantum Error Detection in a Surface Code* arXiv:1912.09410

[9] Fowler et al.: *Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation* (PRA **86**, 032324 (2012))

[10] H. Bombin: *An Introduction to Topological Quantum Codes* arXiv:1311.0277

[11] Ville Lahtinen, Jiannis K. Pachos *A Short Introduction to Topological Quantum Computation* *SciPost Phys.* **3**, 021 (2017)

Budapest, 2022.05.10.