

3. 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

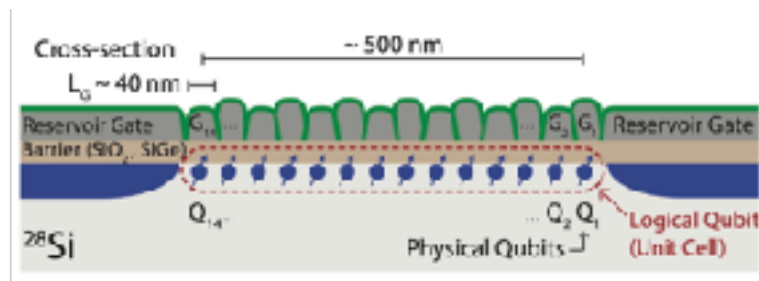
A kvantumszámítógép egy a kvantumos információ manipulálására alkalmas berendezés, melynek egyik legismertebb fajtájában az információt két állapotú kvantumrendszerben, ún. kvantumbitekben tároljuk, hasonlóan a klasszikus számítógépek bit alapú adattárolásához. Ellenben a kvantumbitek alapvetően különböznek 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 oldaldnak 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 kvantumbitet 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 vázlatja. Szilíciumban 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 qubikként és az elrendezés használható repetition kódként. Az eszközön hibadetektáló javító algoritmusok készíthetők.

2. Célkritizálás:

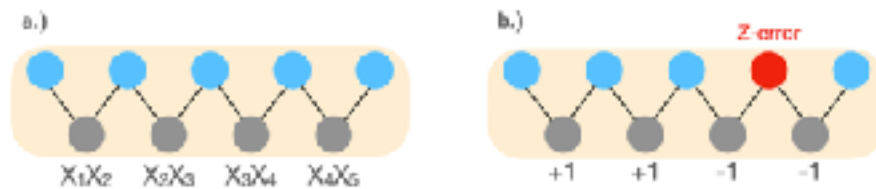
A kutatás célja, hogy elméleti úton vizsgáljuk kvantumos hibajavító kódok implementálásnak lehetőségét spin-quantumbit alapú rendszerekben. Fő kérdésként azt vizsgáljuk, hogy milyen hibaforrások esetén kapunk az ismétlő kódok segítségével robusztusabb logikai kvantumbitet, mintha egyetlen kvantumbiten kódolnánk az információt. Bit-flip/ phase-flip ismétlő kódok megvalósításának lehetőségét vizsgálnánk releváns, realiztikus zaj-mechanizmusok mellett: qubit relaxáció, depolarizáció, inkohereus 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

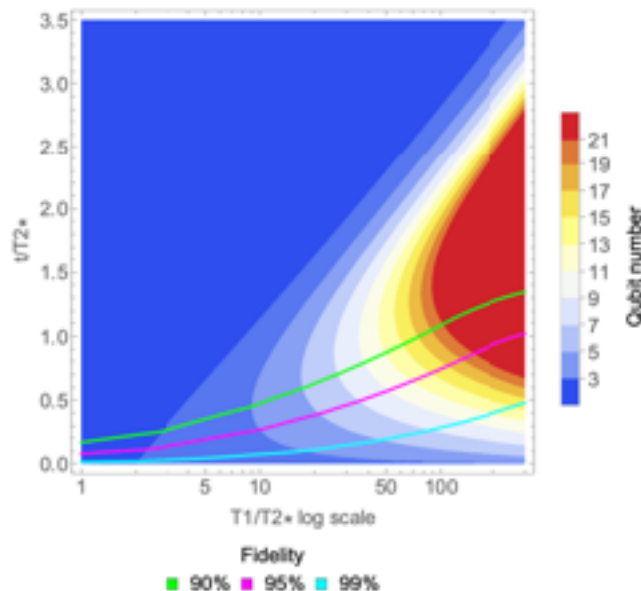
rendkívül magas zajszint mellett is végre tudnak hajtani hasznos részfeladatokat, másrészt pedig tesztek és benchmarkokat alakítsunk ki, amelyek iránt a kvantuminformatika fejlődésének jelenlegi szakaszában óriási érdeklődés mutatkozik. Módszertanilag a vállalati partner (Wigner FK) mérésekkel befolyásolt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

Aktuális félévben végzett kutatási tevékenységeim:

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



A szimulációk eredményeképpen egy iránymutatást tudunk adni mérnököknek, hogy miként építsék meg (hány qubit hosszú kódból építsék fel) a quantum processzort, amely a legjobban véd a legrealisztikusabb hibáktól. Ezen hibák jellemezhetők a T1 és T2* koherencia-időkkel, melyeket bizonyos mértékig tudnak hangolni a mérnökök, valamint azaz egyes platformok közül úgy választani, hogy ideálisak legyen ezek a paraméterek.



A szimulációkból, illetve az elméleti megfontolásokból egyértelműen látszik, hogy a szupravezető alapú quantum processzorokból nem, azonban a félvezető (spin) alapú platformokon megéri ilyen típusú kódokat építeni hibajavítás szempontjából.

Tanulmányi tevékenységeim az aktuális félévben:

Az alábbi kurzusokat végeztem el:

- Tömbi nanoszerkezetű anyagok

Konferenciák, szemináriumok:

Részt vettem az IBM Quantum Machine Learning Summer School programján, ami júliusban kerül megrendezésre. Az IBM Qiskit kvantumszámítógépein gépi tanulós algoritmusokat programoztunk.

Részt vettem a Quantum Techniques in Machine Learning virtualise konferencián (2021. november 8-12.), ahol a kvantum gépi tanulási módszerek aktuális eredményeiről tartottak előadásokat, illetve diszkutáltán, hogy mire és miként lehet érdemes használni a közeljövőben.

Részt vettem a XIII. Országos Anyagtudományi Konferencián (2021. október 10-12.), ahol szilárdtestfizikával kapcsolatos előadásokat hallgattam, mely releváns lehet a kvantumszámítógép platformok építése céljából.

Részt vettem a Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciáján (2021. szept. 16-18.), amin ismertető előadást tartottam kvantuminformatikából és bemutattam a kutatási projektet.

Részt vettem a QNL HunQuTech konferenciáján (2021. október 7.), amin egy poszteren keresztül mutattam be a kutatási eredményeimet.

Heti rendszerességgel veszek részt a kutatócsoportom Journal Club tematikájú online meetingjén, amin magam is tartottam 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.

A Wigner FK-val közösen Kooperatív Doktoranduszi Pályázatot nyújtottunk be.

Oktatói tevékenységeim:

Ebben a félévben a Klasszikus Fizika Laboratórium egyik gyakorlatvezetője voltam (heti 1x 4 óra). A félév során jelenléti oktatásban voltam mérésvezető 4 mérésnél. Tartottam konzultációt és javítottam jegyzőkönyveket is. Már jelentkeztem a következő félévre szintén mérésvezetőnek.

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.

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, 2022.01.05.