

2. FÉLÉVES BESZÁMOLÓ

Rozgonyi Áron (aaron9605@student.elte.hu)

Anyagtudomány és Szilárdtestfizika PhD program

Témavezető: Dr. Széchenyi Gábor

A dolgozat címe: Kvantumos hibajavítás topologikus kvantumszámítógépekben

Kvantumos hibajavítás lineáris kvantumdot rendszerekben ismétlő kódok segítségével

Kutatási téma rövid összefoglalása

Elméleti munkám során a kvantumos ismétlő kódokkal (repetition code) [1,2] foglalkozok, amelyekkel lineáris kvantumdot rendszerekben lehet kvantumos hibadetektálást és javítást végezni. Előzetes terveink szerint a kutatás során ezen kódok megvalósításának lehetőségét vizsgáljuk szilárdtestfizikai kvantumdot rendszerekben.

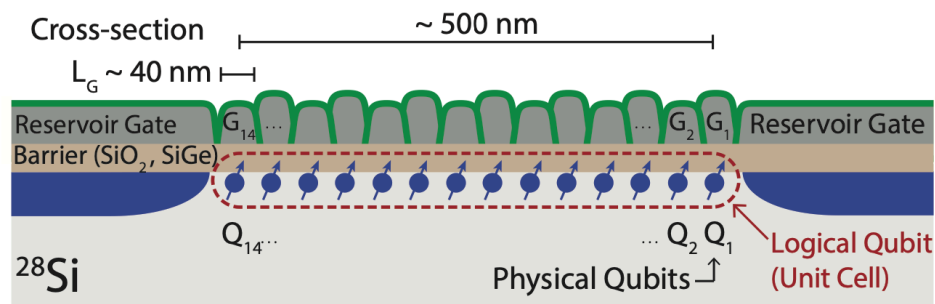
Kutatási témám részletesebb leírása

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 kvantum hibajavítás alapját az képezi, hogy nem egyetlen fizikai kvantumbit 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 korrigálni tudjuk annak értékét.

Az ismétlődő kód az egyik legegyszerűbben, akár 5 kvantumbiten megvalósítható kvantum hibajavító kód, melynek egyszerűsége mellett, számos hátránya is akad. A kód felskálázásával nem lehet pontosítani a kvantum hibajavítást, illetve nem képes megvédeni az információt az összes egykvantumbites hibától. Az egykvantumbites Pauli X-hibák (bit/spin átfordulás) korrigálására az ún. bit-flip kódot, a Z-hibák (fázis hibák) korrigálására a phase-flip kódot használjuk. Skálázható, univerzális hibajavító kódokat a bit-flip és phase-flip kódok egymásba ágyazásával juthatunk. Az ismétlődő kódok egyik legnagyobb előnye a híresebb két-dimenziós ún. surface és toric kódokkal [7,8,9] szemben, hogy könnyen implementálható egyszimulációs rendszerekben, ahol egy láncra fűzve egymást követik a kvantumbitek. Ismétlődő kódokat már többféle platformon is sikerült kísérletileg megvalósítani, mint például szupravezető kvantumbitekből [4], illetve hiba-detektálásra 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 felfogható egy db logikai qubitként és az elrendezés használható repetition kódként. Az eszközön hiba detektáló javító algoritmusok készíthetők.

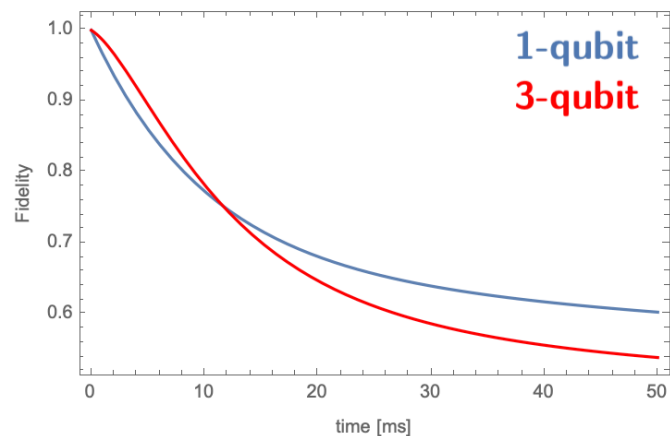
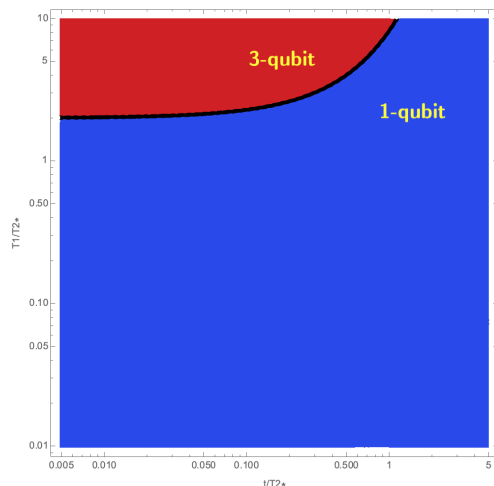
Célkitűzés:

A kutatás célja, hogy elméleti úton vizsgáljuk kvantum hibajavító kódok implementálásának lehetőségét spin-quantumbit alapú rendszerekben. Fő kérdésként azt vizsgáljuk, hogy milyen hibaforrások esetén kapunk az ismétlődő kódok segítségével robusztusabb logikai kvantumbitét, mintha egyetlen kvantumbiten kódolnánk az információt. Bit-flip/ phase-flip ismétlődő kódok megvalósításának lehetőségét vizsgálnánk releváns, realisztikus zaj-mechanismusok mellett: qubit relaxáció, depolarizáció, inkoherens 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 kvantum információt.

Aktuális félévben végzett kutatási tevékenységeim:

A célkitűzés pontban említett zaj-mechanizmusok közül eddig a qubit relaxációval és depolarizációval foglalkoztam. A vizsgált rendszer egy 3 és 5 qubites bitflip és phaseflip ismétlődő kód. Teljes sűrűségmátrix szimulációs eljárással, a Bloch-Redfield differenciál egyenletek megoldásával, illetve Kraus operátorok alkalmazásával meghatároztam egy olyan break-even pontot, ami konkretizálja, hogy attól a ponttól kezdve megéri váltani 1 fizikai qubitról 3 illetve 5 qubites kódra. A konklúzió végül az, hogy a bitflip kódot ezen hiba mechanizmusoknál nem éri meg használni, ellenben a phaseflip kód esetében lehet találni egy olyan T_1 (relaxációs idő) és T_2^* (inhomogén fázisvesztési idő) paraméter tartományt, melyek esetében megéri váltani nagyobb 3 illetve 5 qubites kódokra, hogy a kvantuminformációt ezen zaj típusoktól védettebben kezeljük.



Tanulmányi tevékenységeim az aktuális félévben:

Az alábbi kurzusokat végeztem el:

- Rácshibák 2 (Érdemjegy: 5)
- Nyitott kvantumrendszerek elmélete (Érdemjegy: 5)
- Deep learning és gépi tanulás a tudományokban (Érdemjegy: 5)

Oktatói tevékenységeim:

Ebben a félévben a Klasszikus Fizika Laboratórium egyik gyakorlatvezetője voltam (heti 1x 4 óra). A félév során távolléti 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.

Konferenciák, szemináriumok, pályázatok:

Jelentkeztem az IBM Quantum Machine Learning Summer School programjára, ami júliusban kerül megrendezésre. Az IBM Qiskit kvantumszámítógépeim fogunk gépi tanulási algoritmusokat programozni.

Heti rendszerességgel veszek részt a kutatócsoportom Journal Club tematikájú online meetingjén, amin magam is rendszeresen tartottam előadást egy-egy aktuális új cikk ismertetése 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.

ÚNKP pályázatot nyújtottam be “*Kvantumos hibajavítás lineáris kvantumdot rendszerekben ismétlődő kódok segítségével*” címen.

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, 2021. június 15.