

1. FÉLÉVES BESZÁMOLÓ

Rozgonyi Áron (a.rozgonyi96@gmail.com)

Anyagtudomány és Szilárdtestfizika PhD program

Témavezető: Dr. Széchenyi Gábor

A dolgozat címe: Kvantumos hibajavítás topologikus kvantumszámítógépekben

Bevezetés:

Msc diplomamunkámat más témakörből írtam (spin alapú kvantumbitekből épített logikai kvantumkapuk optimalizálása). A topologikus kvantumszámítással Dr. Széchenyi Gábor (ELTE, Anyagfizikai Tanszék) ismerttetett meg, az elkövetkező években doktori kutatásaimat ő vezetésével végzem egy olyan informális kutatócsoport keretében, melynek további szenior tagjai Dr. Asbóth János (BME, Elméleti Fizika Tanszék), Dr. Pályi András (BME, Elméleti Fizika Tanszék) és Dr. Oroszlány László (ELTE, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék). A csoport elméleti szilárdtestfizikával foglalkozik, főprofiljukba topologikus tulajdonságú anyagok, illetve szilárdtestekben definiált kvantumbitek elméleti vizsgálata tartozik.

Kutatás ismertetése:

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 [1], 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 művelet 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 korrigálni tudjuk annak értékét.

Amennyiben több fizikai kvantumbitot használunk a logikai kvantumbit tárolására, akkor a dinamikai fázis kiküszöbölése céljából érdemes logikai 0 és 1-nek a rendszer két azonos energiájú állapotát megfeleltetni. Különösen érdekesnek bizonyulnak azok a rendszerek, ahol a két alapállapot közötti gerjesztés nem lokális, mert ilyenkor az információt a lokális zajoktól védetten tudjuk tárolni. Ezek az általában kétdimenziós rendszerek leírhatóak anyonikus elemi gerjesztések segítségével is. Az anyonok olyan különleges részecskék, melyek felcserélésre nem a megszokott bozonikus vagy fermionikus tulajdonságot mutatják. Ezekben a rendszerekben az anyonok valós térben történő felcserélésével topologikusan védetten tudunk különböző kvantumkapukat megvalósítani. Azokat a kvantumszámításokat, melyek nem-ábéli anyonokkal/ kvázi-részecskékkel történik topologikus kvantumszámításnak nevezünk. Sajnálatos módon még egyetlen olyan modellt sem találtak, ahol univerzális kapukészletet topologikusan védetten tudnának elvégezni.

Az egyik első egzaktul megoldható modell, ahol anyonokkal írhatóak le a gerjesztések A. Kitaev által megalkotott toric code (tórusz kód) [2]. A rendszer egy tóruszra rakott négyzetlánc, ahol a két állapotú alrendszerek a négyzet élein helyezkednek el. A Hamilton-operátor szokatlan négy spin kölcsönhatásokat tartalmaz. A modell kísérletileg nehezen megvalósítható a különös geometria és a szokatlan kölcsönhatási tagok miatt. Tovább lépést az ún. surface kód jelentheti, ahol tórusz helyett sík geometriát kell tekinteni. A különös kölcsönhatásokat pedig folyamatos mérések sorozatával tudják kiváltani.

A tavalyi év végén először demonstrálták kísérletileg A. Wallraff zürichi csoportjában a kvantumos hibajavítást [3] egy 7 kvantumbitből álló chipen. Ezen a chipen már sikeresen futtatható egy 7 kvantumbitre tervezett surface kód. A hét kvantumbitből négyet használnak adat tárolásra, hármat (az ún. ancilla kvantumbiteket) pedig a fellépő hibák monitorozására. Ezzel megtörténtek az első lépések egy jövőbeli hibajavító kvantumszámítógép kifejlesztésének irányába.

Aktuális félévben végzett kutatási tevékenységeim:

Az első félévet a témával való ismerkedéssel, tanulással, a szükséges fogalmak elsajátításával töltöttem. A témában írt kiváló összefoglaló cikkek [4-6] alapján elsajátítottam a topologikus kvantumszámítás és a surface kód elméletét. Ezek alapján megírtam egy szimulációt, amely meghatározza egy 5x5-ös surface kód alapállapotát Fock-tér reprezentációban, illetve véletlenszerű Pauli-X (bit flip), Z (phase-flip) hibákat detektál.

Tanulmányi tevékenységeim az aktuális félévben:

Az alábbi kurzusokat végeztem el:

- Point defects in crystals
- Quantum information theory
- Quantum computing architectures (BME)

Konferenciák, szemináriumok:

Részt vettem a BME-n szervezett *Kvantumszámítások Őszi Iskola* 3 napos online programján, ahol többek közt megismerkedtünk az IBM kvantumszámítógépein való algoritmusok programozásával.

Heti rendszerességgel veszek részt a kutatócsoportom Journal Club tematikájú online meetingjén, amin magam is tartottam előadást egy friss cikk ismertetése céljából.

Felkérésre tartottam egy online előadást a kvantuminformatika alapjairól az alapszakos fizikus hallgatóknak a Kvantummechanika gyakorlat utolsó óráján. Az előadás célja, az alapfogalmak ismeretének átadása, az aktuális kvantumszámítógép prototípusok ismertetése és az érdeklődés felkeltése annak érdekében, hogy foglalkozzanak a témával. Ismertettem velük a kutatócsoporthoz való csatlakozás lehetőségét, elérhetőségeket.

Oktatói tevékenységeim:

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

ELTE BEAC szerződéses sportösztöndíjasaként tartok 3. 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] F. Arute et al., Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, Nature 574, (2019)
- [2] A. Yu. Kitaev. Fault-tolerant quantum computation by anyons. Annals Phys. 303 (2003)
- [3] Andersen et al., Repeated Quantum Error Detection in a Surface Code arXiv:1912.09410
- [4] Fowler et al.: Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation (PRA 86, 032324 (2012)
- [5] H. Bombin: An Introduction to Topological Quantum Codes arXiv:1311.0277
- [6] Ville Lahtinen, Jiannis K. Pachos A Short Introduction to Topological Quantum Computation SciPost Phys. 3, 021 (2017)

Budapest, 2021.01.17.